INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Diciembre 2020 • N.º 531 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición españo… …RICAN

VISITANTES INTERESTELARES

'Oumuamua y Borisov, las rocas procedentes de mundos lejanos que desconciertan a los astrónomos

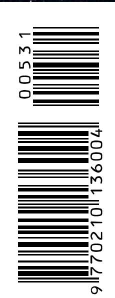
CORONAVIRUS
Lecciones del SIDA para combatir la COVID-19

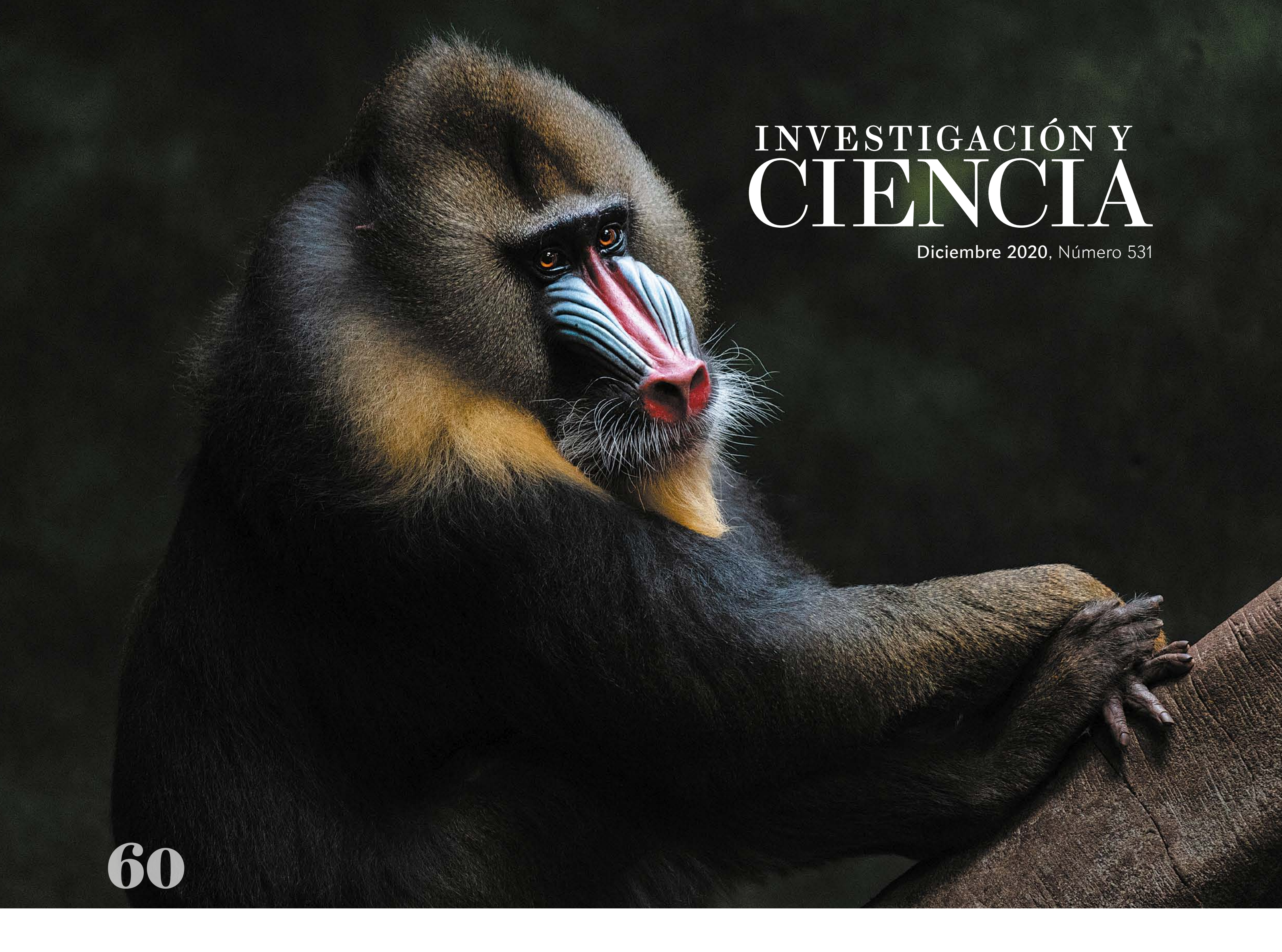
EVOLUCIÓN HUMANA
Origen evolutivo de nuestros problemas dentales

FÍSICA MATEMÁTICA
La solución a un largo misterio cuántico

VISITANTES INTERESTELARES | DEL SIDA A LA COVID-19 | LA SOLUCIÓN A UN LARGO MISTERIO CUÁNTICO

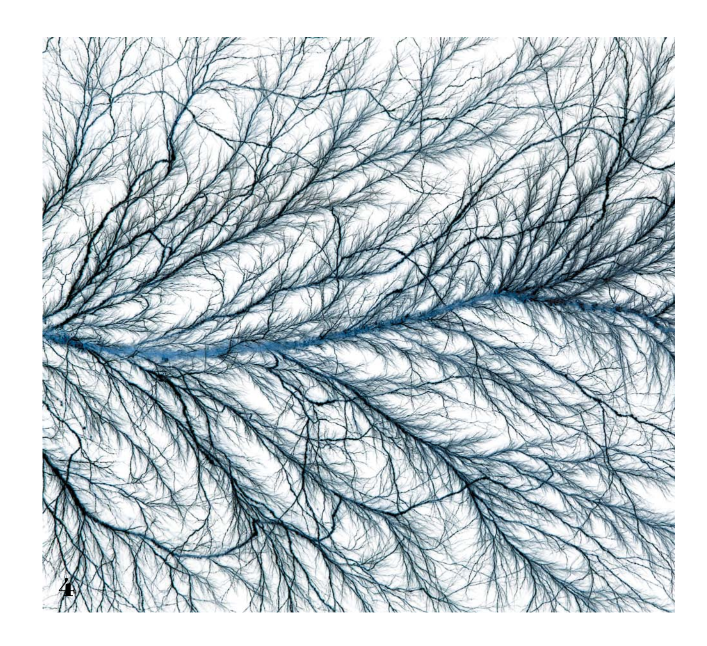
DICIEMBRE 2020 N.º 531





RALF GELFAND, GETTY IMAGES

ARTÍCULOS



58



INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



En los últimos años hemos detectado por primera vez dos visitantes interestelares, objetos llegados al sistema solar desde fuera de él. El primero de ellos, 1I/'Oumuamua, ha desconcertado a los científicos debido a su forma muy alargada y a que parece impulsado por alguna fuerza no gravitatoria, pese a no mostrar la emisión de gas típica de los cometas. Ilustración del Observatorio Europeo Austral/M. Kornmesser.

redaccion@investigacionyciencia.es



Septiembre 2020

PARTÍCULAS MUTANTES

En «Neutrinos ocultos» [Investigación y Ciencia, septiembre de 2020], William Charles Louis y Richard G. Van de Water describen las oscilaciones de neutrinos, o la transformación espontánea de neutrinos de un tipo en neutrinos de otro. En general, cuando una partícula ordinaria se desintegra y se transforma en otra, el proceso puede verse como si la partícula tuviera un «exceso de energía» que la hace inestable: pasa de un estado más energético a otro menos energético. Sin embargo, en el caso de las oscilaciones de neutrinos, la existencia de un ciclo parece implicar la recuperación de la energía liberada. El neutrino pasa de un estado más energético a otro menos energético, para, de alguna manera, volver después al estado de mayor energía. ¿Cómo es eso posible?

Alberto Bellido de la Cruz
Zaragoza

El artículo describe el experimento Coherent CAPTAIN-Mills (CCM) para buscar neutrinos estériles. La estrategia consiste en usar un detector móvil que pueda desplazarse unas decenas de metros con respecto de una fuente de neutrinos muónicos. Si, al variar esa distancia, se observan desviaciones con respecto al número de neutrinos esperados, ello podría indicar que se han producido oscilaciones hacia la forma estéril. Frente a detectores mucho mayores e inmóviles, como IceCube o Super-Kamiokande, esta estrategia tiene la ventaja de que permite obtener «una secuencia de fotogramas» del proceso de oscilaciones.

Pero ¿no sería posible emplear IceCube y Super-Kamioikande del mismo modo? Si estos detectores sondeasen la variación de neutrinos solares entre el perihelio y el afelio de la órbita terrestre, podrían obtener datos similares en una escala de distancias mucho mayor.

Miguel Ángel Lapeña
La Alberca, Murcia

Responde Louis: *Las oscilaciones de neutrinos ocurren porque cada uno de los distintos «sabores» (como el neutrino muónico o el electrónico) consta de una superposición de autoestados de masa, lo que implica que no tiene una masa bien definida. Como consecuencia, cuando un neutrino muónico oscila y se convierte, por ejemplo, en uno electrónico, la energía de la partícula permanece constante y no cambia en ningún momento.*

A Lapeña: Las oscilaciones de neutrinos solares están dominadas por la escala de masas $m_2^2 - m_1^2 \approx 7 \cdot 10^{-5}\ eV^2$ *(donde* m_1 *y* m_2 *denotan las masas de dos de los autoestados de masa y eV indica electronvoltios). Como consecuencia, los experimentos con neutrinos solares tienen poca sensibilidad a las oscilaciones de neutrinos estériles, las cuales están asociadas a una escala de masas mucho mayor. Los neutrinos detectados por CCM viajan distancias muy cortas, gracias a lo cual no se ven afectados por la escala de masas de* $7 \cdot 10^{-5}\ eV^2$*. Es esto lo que permite que CCM sea sensible a las oscilaciones de neutrinos estériles.*

FÍSICA DE LAS CIUDADES

El artículo «Una nueva ciencia de la movilidad urbana» [por Aleix Bassolas, Mattia Mazzoli y José Javier Ramasco; Investigación y Ciencia, septiembre de 2020] propone un modelo basado en una teoría de campos para describir los desplazamientos urbanos. En dicho modelo el campo en cuestión viene dado por los desplazamientos de los habitantes. Sin embargo, los campos físicos, como el asociado al movimiento del agua en un río, son continuos, mientras que una persona que se desplaza hace constantes paradas (en un semáforo, al esperar un medio de transporte, etcétera). ¿Cómo pueden entenderse tales paradas recurriendo a la analogía de un campo físico?

Por otro lado, el modelo solo considera los desplazamientos del domicilio al trabajo. ¿Se han tenido en cuenta también los desplazamientos de vuelta? ¿Cómo afecta a la validez del modelo no haber incluido los trayectos de fin de semana o durante las vacaciones?

J. M. Solana
Villalba, Madrid

Responde Ramasco: *Más que un modelo, el trabajo muestra una nueva forma de ver la movilidad a gran escala mediante la introducción de herramientas matemáticas asociadas a la teoría de campos. Usamos varios modelos generadores de flujos de viajes para comprobar si los resultados empíricos se corresponden con las predicciones teóricas, pero el análisis básico se sustenta en datos, no en modelos.*

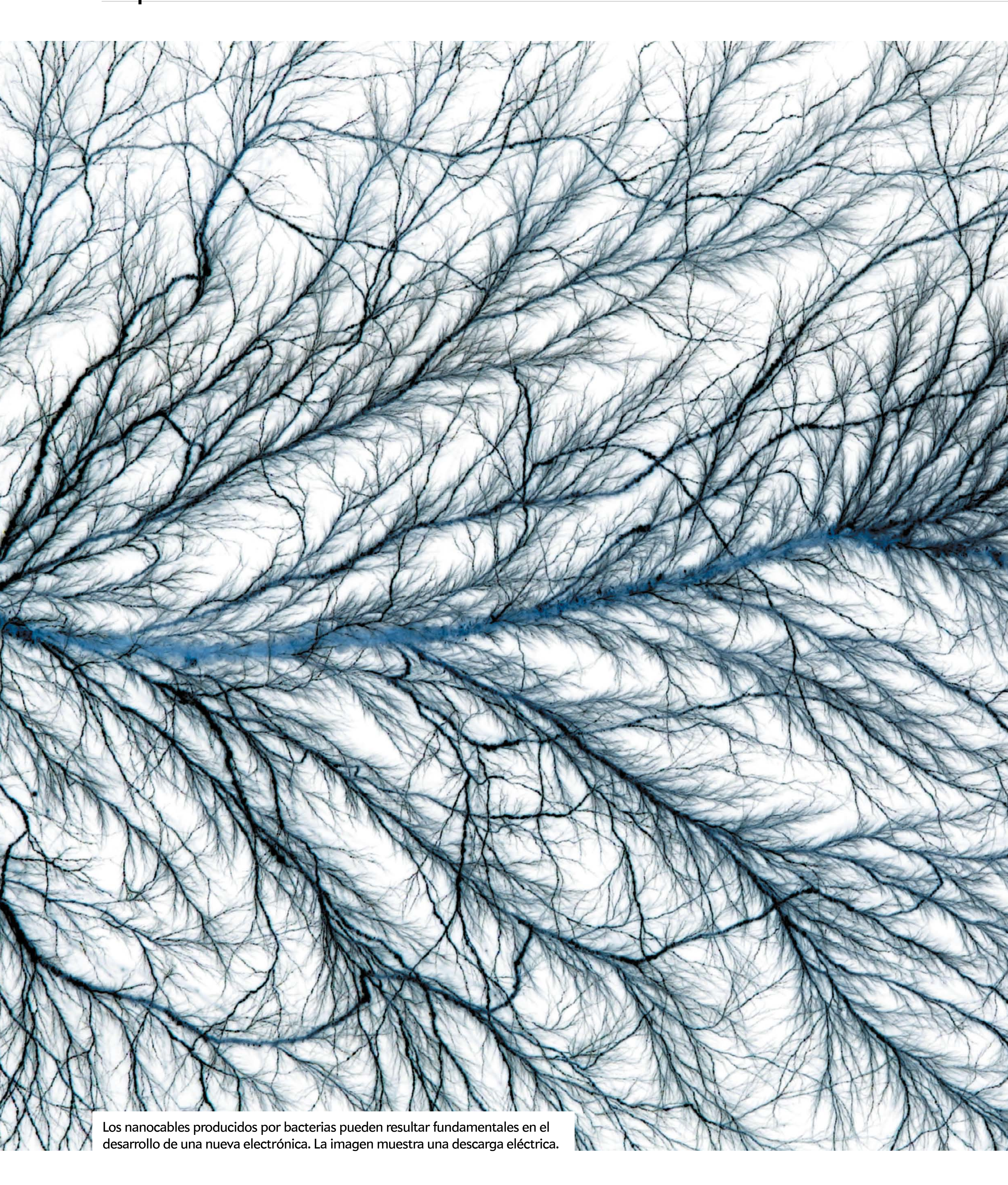
Es cierto que los campos suelen definirse en el continuo y que suelen comportarse bien frente a cambios de escala. Sin embargo, el ejemplo propuesto por el lector (el agua como fluido) es una buena metáfora de lo que hacemos. Los líquidos están formados por moléculas, las cuales son elementos discretos, al igual que los individuos que definen la movilidad en las ciudades; mientras que los campos, como el de velocidad, se definen sobre elementos de masa (volúmenes pequeños que contienen muchas moléculas). De manera similar, los campos que nosotros usamos se definen sobre poblaciones, no sobre individuos, y caracterizan la movilidad promedio de la población. Lo que haga una molécula o un individuo particular contribuye a la población, pero no cuenta para la definición de los campos.

Los desplazamientos casa-trabajo tienen la particularidad de que se repiten cada día laboral y, por tanto, el tiempo y la distancia desempeñan un papel clave: nadie quiere viajar horas y horas todos los días para ir a trabajar. De hecho, hay una hipótesis sobre el valor del tiempo en el transporte, propuesta por el investigador Cesare Marchetti, la cual postula que intentamos evitar desplazamientos pendulares más largos de una hora. Eso hace que los viajes casa-trabajo, muy comunes, sean también más sencillos de estudiar, pues son más regulares. La introducción de otros tipos de movilidad es algo que estamos estudiando en estos momentos.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Valencia 307, 3.º 2.ª, 08009 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



Los nanocables producidos por bacterias pueden resultar fundamentales en el desarrollo de una nueva electrónica. La imagen muestra una descarga eléctrica.




TED KINSMAN, SCIENCE SOURCE

TECNOLOGÍA

Cables biológicos

Se empieza a desvelar el enigma de los nanocables microbianos que transportan electrones

Las bacterias del género *Geobacter* tienen aspecto de alubias de las que brotan colas largas parecidas a cables; y, de hecho, resulta que estos «nanocables» conducen la electricidad. Los científicos que han pasado décadas estudiando estos microorganismos conductores abrigan la esperanza de desarrollar una tecnología viva segura que funcione en el interior del cuerpo humano, resista la corrosión o incluso extraiga electricidad literalmente de la nada. Sin embargo, para llevarlo a la práctica, primero ha de desentrañarse el misterio sobre la función real de estas fibras minúsculas, lo que ha incitado un vigoroso debate.

Derek Lovley, microbiólogo de la Universidad de Massachusetts en Amherst, descubrió las capacidades conductoras de *Geobacter* cuando se propuso averiguar el mecanismo por el que estas bacterias se libran de los electrones originados durante su proceso de generación de energía. La mayoría de los microbios necesitan transferir electrones a moléculas de oxígeno vecinas para «respirar», pero *Geobacter* prospera en ambientes carentes del gas. Lovley se percató de que estos microorganismos producen largas cadenas de proteínas que transportan los electrones a los óxidos de hierro cercanos, los cuales se transforman en magnetita por la acción de las partículas cargadas. Desde entonces se han encontrado otros nanocables de proteínas, pero Lovley cree que cierto tipo de estos filamentos, conocidos como pili, desempeña un papel primordial. No obstante, las técnicas de imagen tradicionales no permiten investigar las proteínas que componen los pili, denominadas pilinas, debido a su pequeño tamaño, de modo que Lovley demostró su importancia eliminando el gen asociado a la formación de los pili. Sin él, *Geobacter* no podía convertir el óxido de hierro en magnetita. Además, halló que los filamentos que había recolectado de las células conducían la electricidad.

El equipo ya ha desarrollado antes aplicaciones que se sirven de microbios conductores vivos, pero Lovley aspira a cultivar los propios nanocables para construir dispositivos electrónicos respetuosos con el ambiente. Ha sido coautor de dos artículos recientes sobre sensores

fabricados con nanocables de *Geobacter*: uno, descrito en la revista *Nano Research*, detecta amoníaco; el otro, detallado en *Advanced Electronic Materials*, es sensible a los cambios de humedad. Además, otro dispositivo, que su grupo describió en *Nature*, emplea nanocables para arrancar electrones a las moléculas de agua presentes en el aire; de este modo, se genera electricidad a partir de la humedad. «Ofrece algunas ventajas sobre otros métodos sostenibles de producción de energía, como la solar o la eólica, pues se trata de un proceso continuo que opera las 24 horas del día. Y funcionará en casi cualquier ambiente de la Tierra», explica Lovley.

El experto sugiere que los nanocables podrían sustituir a las baterías como fuente de alimentación de algunos aparatos. «Ya usamos nanocables de proteínas para generar energía a pequeña escala, como en los parches de monitorización médica», afirma. Y añade que estos filamentos pueden funcionar en tejido vivo sin que desencadenen una reacción adversa y que son más biodegradables que los metales.

Lovley asegura que varias empresas han manifestado interés en este tipo de aplicaciones. Sin embargo, algunos científicos se muestran escépticos sobre la eficacia de separar los nanocables de las bacterias que los producen. «Fuera de su contexto natural, las proteínas que poseen propiedades eléctricas han de competir con los materiales sintéticos», explica Sarah Glaven, bióloga del Laboratorio de Investigación Naval de los Estados Unidos. Los nanocables «tendrían dificultades para superar a un metal conductor». Glaven ha colaborado con Lovley en el pasado, pero no participa en la investigación actual; ella se centra en la modificación genética de bacterias conductoras para aplicarlas en instrumentos tales como sensores marinos.

La bióloga señala que los nanocables contarían con ventaja en entornos como el océano o el cuerpo humano, que corroen los componentes electrónicos tradicionales. Sin embargo, aun en esas condiciones, los nanocables aún tendrían que rivalizar con materiales tales como los polímeros biocompatibles. Ella prefiere trabajar con microbios vivos porque «no solo ofrecen un material portador de electrones, sino también el sistema completo de procesamiento de información que hay en la misma célula».

A pesar de que ya se han empezado a idear aplicaciones tanto para células vivas como para nanocables recolectados —incluso se ha explorado la modificación de la prolífica bacteria *Escherichia coli* para fabricar pili—, aún persisten interrogantes sobre las proteínas que forman los nanocables más productivos. Comprender qué tipo de filamentos transporta la mayor parte de la electricidad ayudaría a los científicos a seleccionar el material más adecuado para construir dispositivos electrónicos.

«Todos, también nosotros, pensábamos que los nanocables cruciales eran los pili», admite el biofísico Nikhil Malvankar, que trabajó con Lovley y que en la actualidad dirige su propio laboratorio en la Universidad Yale. Sin embargo, el año pasado Malvankar y sus colaboradores obtuvieron imágenes de bacterias *Geobacter* con un microscopio electrónico y, tras analizarlas, llegaron a la conclusión de que el principal método de transmisión de electricidad de los microbios no lo constituyen las pilinas, que son como hilos, sino apilamientos de proteínas llamadas citocromos. Los investigadores examinaron una biopelícula de la bacteria por medio de experimentos de modificación genética, así como mediante diversas técnicas de imagen; Glaven afirma que «han puesto toda la carne en el asador» para conseguir una visión precisa de los nanocables utilizados por *Geobacter*. El equipo de Yale identificó un citocromo conductor hipereficiente, denominado OmcZ, que la bacteria produce en respuesta a un campo eléctrico, como el método principal de la biopelícula para emitir electrones. «Hay que ver para creer, así que considero que las técnicas microscópicas son muy importantes», señala el físico de Yale Sibel Yalcin, coautor del trabajo.

No obstante, los investigadores aún discrepan sobre cuál es el nanocable esencial. Algunos se decantan por los pili; otros, por los citocromos. Lovley es un firme defensor de los primeros: asegura que, cuando su equipo (que por entonces incluía a Malvankar) modificó genéticamente *Geobacter* para impedir que sintetizara cierto tipo de

BIOLOGÍA SINTÉTICA

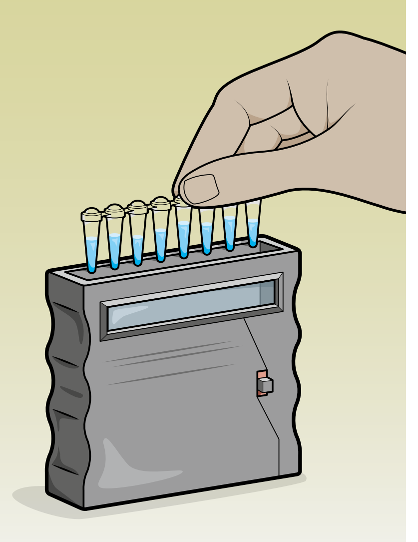
Biosensores de contaminantes

Un método basado en la maquinaria celular bacteriana permite analizar la contaminación del agua

Los vertidos industriales, la escorrentía agrícola, los productos farmacéuticos y otros residuos contaminan las aguas de todo el mundo y su detección cuesta tiempo y dinero. Ahora, un grupo de investigadores ha desarrollado una forma rápida y potencialmente económica de analizar hasta 17 contaminantes peligrosos, entre los que figuran el plomo, el cobre y los antibióticos, según un estudio publicado en la revista *Nature Biotechnology*.

La prueba se inspira en las bacterias, que poseen una especial destreza para reaccionar ante contaminantes específicos. «La naturaleza lleva miles de millones de años solucionando este problema», afirma el coautor del estudio Julius Lucks, ingeniero químico y biológico de la Universidad del Noroeste. Su equipo indagó en la bibliografía científica a fin de averiguar qué proteínas producen los microorganismos para lidiar con diversos contaminantes. Las reacciones de estas las aprovecha el nuevo dispositivo de análisis portátil usando una serie de viales: cada uno de ellos lleva una solución liofilizada de una proteína específica que provoca que la mezcla brille de color verde cuando se añade una gota de agua contaminada de una determinada sustancia.

Cada solución contiene hebras de ADN, diseñadas a medida, que constan de una sección a la que se une una proteína que detecta contaminantes y otra sección que genera un brillo fluorescente cuando se activa. Las soluciones también contienen la enzima ARN polimerasa, que sintetiza ARN


Para llevar a cabo la prueba, se añade una gota de agua a cada vial; cuando estos se observan en el dispositivo, los viales brillan si el agua contiene el contaminante establecido.

BROWN BIRD DESIGN

citocromo, se formaron biopelículas que conducían mejor la electricidad que las producidas por bacterias no modificadas. Glaven alega que su propio laboratorio ha encontrado que en una biopelícula de *Geobacter* circula una cantidad «abrumadora» de electricidad a través de citocromos. Sin embargo, la bióloga señala también que otro laboratorio, este de la Universidad Estatal de Michigan, aún continúa apoyando la hipótesis de Lovley sobre los pili.

En virtud de su investigación más reciente, Malvankar se inclina por los citocromos, pero no ha descartado que los pili desempeñen una función. «Todos los filamentos que encontramos cuando las bacterias conducían activamente la electricidad eran citocromos», explica. «Pero ¿no es posible que, en ciertas condiciones, estuvieran formándose pili? Es una cuestión aún sin resolver.»

El avance en la determinación de las proteínas conductoras de la *Geobacter* podría guiar a los investigadores a desarrollar sistemas electrónicos vivos más eficientes. Incluso sin un conocimiento completo de los misterios que encierran los microbios conductores, los dispositivos basados en bacterias quizá se hallen a la vuelta de la esquina. Aún es pronto, admite Lovley, «pero hasta ahora todo ha ido por buen camino. He tenido colaboradores increíbles que saben aprovechar al máximo los materiales electrónicos. Se les ocurren ideas nuevas cada dos por tres».

—Sophie Bushwick

---

a partir de la secuencia de ADN. La proteína unida al ADN cambia de forma si encuentra su correspondiente contaminante y, como consecuencia, se desprende. Esto permite a la ARN polimerasa desplazarse a lo largo de la hebra de ADN, tiñendo la muestra de un color verde fluorescente.

El estudio hace «un uso excelente de la biología sintética, inteligente y creativo, y pone de relieve las bondades de esta disciplina», destaca la bióloga sintética de la Universidad de Boston Mary Dunlop, que no participó en la investigación.

Los científicos han empleado un método similar para detectar patógenos, pero el dispositivo es el primero capaz de identificar tantos contaminantes. Susan Richardson, química de la Universidad de Carolina del Sur experta en temas relacionados con el agua, que tampoco participó en la investigación, asegura que la prueba es «muy prometedora». No obstante, advierte de que quizá sea necesario que reaccione con concentraciones más bajas de contaminantes antes de que se extienda su uso.

—Susan Cosier

MEDIOAMBIENTE

La fauna en Chernóbil

Un estudio confirma que en las áreas más contaminadas hay menos mamíferos

Más de 30 años después del accidente nuclear de Chernóbil, la actividad humana sigue siendo casi inexistente en un radio de unos 29 kilómetros alrededor de la central, lo cual crea un refugio para la vida silvestre. Pero los científicos discrepan respecto a los efectos persistentes de la radiación en las poblaciones de animales que viven en dicha «zona de exclusión». Un nuevo análisis, basado en el cálculo de las dosis reales que reciben los animales en diversos puntos de esa zona, apoya la hipótesis de que las áreas con más radiación son las que albergan un menor número de mamíferos.

«Los efectos que hemos observado concuerdan con las ideas habituales sobre la radiación», afirma Timothy Mousseau, biólogo de la Universidad de Carolina del Sur y coautor del trabajo, publicado en *Scientific Reports*. «Lo sorprendente es que se haya tardado tanto en analizarlos de manera rigurosa y exhaustiva.»

El estudio reanaliza unos datos obtenidos en 2009. Ese año, los mismos investigadores emplearon los rastros en la nieve para estimar la abundancia de 12 especies de mamíferos, desde ratones hasta caballos y jabalíes, en 161 puntos distribuidos a lo largo de casi 800 kilómetros cuadrados de la zona de exclusión. Y hallaron menos mamíferos en los lugares con mayor radiación de fondo. Sin embargo, dos estudios posteriores no apreciaron una correlación significativa entre los niveles de radiación y la abundancia de mamíferos. Pero Mousseau y sus colaboradores consideran que esos tres trabajos analizaron la exposición a la radiación de un modo simplista.

Dichos estudios se basaron únicamente en mediciones de la radiación ambiental. En su reanálisis, los científicos usaron su recuento original de mamíferos, pero estimaron la dosis total de radiación que recibirían los animales a lo largo de sus vidas combinando datos de cada especie (como el tamaño del área de distribución, la dieta o la longevidad) con los niveles de radiación derivados de muestras de suelo y con cálculos sobre la forma en que los animales entran en contacto con las moléculas radiactivas.

La conclusión fue la misma: las áreas donde calcularon una mayor radiactivad presentaban menos mamíferos. Según Mousseau, muchos estudios previos han vinculado la exposición a esos niveles estimados de radiación con alteraciones genéticas, fisiológicas y reproductivas.

«Se trata de un trabajo importante y bien hecho», asegura Carmel Mothersill, radiobióloga de la Universidad McMaster, en Ontario, que no participó en el estudio. «Mi laboratorio ha empleado el mismo método para volver a analizar los datos de Fukushima y Chernóbil, y hace que la relación entre la exposición a la radiación y el riesgo de sufrir daños resulte mucho más significativa.»

Pero James Beasley, ecólogo especializado en fauna de la Universidad de Georgia y coautor de los dos estudios previos discrepantes, sostiene que el artículo presenta «importantes deficiencias», sobre todo a la hora de determinar la abundancia de los animales. Según el experto, los lugares de medición originales no están espaciados de manera adecuada o suficiente para extraer conclusiones acerca de toda la región.

Karine Beaugelin-Seiller, radioecóloga del Instituto de Radioprotección y Seguridad Nuclear de Francia y primera firmante del trabajo, admite que existen incertidumbres. Aun así, afirma que el estudio ofrece un método más preciso para relacionar la exposición a la radiación con sus efectos, que podría servir de guía para futuras investigaciones.

—Rachel Nuwer

Un zorro en la zona de exclusión de Chernóbil.



DE *CHERNOBYL: A STALKERS' GUIDE*, POR DARMON RICHTER (FUEL PUBLISHING, 2020)

SISMOLOGÍA

Termómetros sísmicos

Las ondas sonoras generadas en los terremotos podrían servir para medir el calentamiento de los océanos.

El sonido podría ofrecer una manera creativa de medir la temperatura de los océanos. Los mares se calientan progresivamente debido al cambio climático y han absorbido alrededor del 90 por ciento del exceso de calor atrapado por los gases de efecto invernadero. Ese calentamiento contribuye a la subida del nivel del mar, amenaza las especies marinas y altera los patrones meteorológicos.

Pero analizar el calentamiento no es fácil. Las mediciones realizadas desde barcos solo captan instantáneas de una pequeña porción del agua, y las observaciones por satélite no logran penetrar demasiado bajo la superficie. El mapa térmico más detallado del océano es el que proporciona Argo, una flotilla de sondas autónomas diseminadas en el mar desde hace más de una década y que pueden descender cerca de 2000 metros. Sin embargo, solo hay unos 4000 de estos flotadores y no tienen acceso a las regiones más profundas de los océanos.

En un estudio publicado en *Science*, un equipo de investigadores del Instituto de Tecnología de California y la Academia China de las Ciencias comparó la velocidad de propagación de las ondas sonoras generadas por distintos terremotos submarinos para evaluar el calentamiento oceánico en áreas más extensas. Dado que el sonido viaja más deprisa en el agua caliente, las diferencias de velocidad pueden revelar cambios de temperatura. «Esto abre la puerta a un área de estudio completamente nueva», afirma Frederik Simons, geofísico de la Universidad de Princeton que no participó en el trabajo.

Los oceanógrafos propusieron usar el sonido para medir la temperatura oceánica ya en 1979, pero los emisores acústicos eran caros y preocupaba que pudieran perturbar a la fauna marina. Inspirado por esos primeros intentos, al investigador del Instituto de Tecnología de California Wenbo Wu se le ocurrió estudiar las ondas sonoras de baja frecuencia generadas por los seísmos que se producen bajo el fondo oceánico. «Sabemos que esos terremotos son fuentes muy potentes», señala Wu. «¿Y si intentáramos aprovecharlos?»

Wu y su equipo pusieron a prueba su idea cerca de la isla indonesia de Nias, donde la placa indoaustraliana choca bajo la de Sunda. Recopilaron datos acústicos de 4272 terremotos de magnitud 3 o superior entre 2004 y 2016, y compararon la velocidad

de las ondas sonoras de los seísmos que ocurrieron en un mismo lugar a lo largo de los años. Al modelizar las diferencias (a menudo, meras fracciones de segundo), hallaron que el océano próximo a Nias se está calentando unos 0,044 grados Celsius por década, una cifra superior a los 0,026 grados que indican los datos de Argo. Aunque pueda parecer una cifra pequeña, se necesita una cantidad de calor considerable para elevar la temperatura de todo el océano Índico oriental.

En opinión de Bruce Howe, oceanógrafo de la Universidad de Hawái ajeno al estudio, la nueva técnica es prometedora. Incluso se podría obtener un historial más extenso de las temperaturas oceánicas a partir de los datos sísmicos registrados hace décadas, aunque los sismómetros más antiguos no cronometraban las ondas sonoras con tanta precisión como los equipos actuales basados en GPS.

Simons y sus colaboradores exploran una técnica alternativa, que consiste en desplegar decenas de micrófonos subacuáticos, o hidrófonos, para captar más ondas sonoras de origen sísmico. No obstante, el experto subraya que determinar la ubicación precisa de los flotadores supondrá un reto. Superar estas dificultades permitiría subsanar importantes lagunas, concluye Wu. «Realmente necesitamos tantos métodos de obtención de datos como sea posible.»

—Stephanie Pappas



LINDSAY IMAGERY, GETTY IMAGES

SALUD

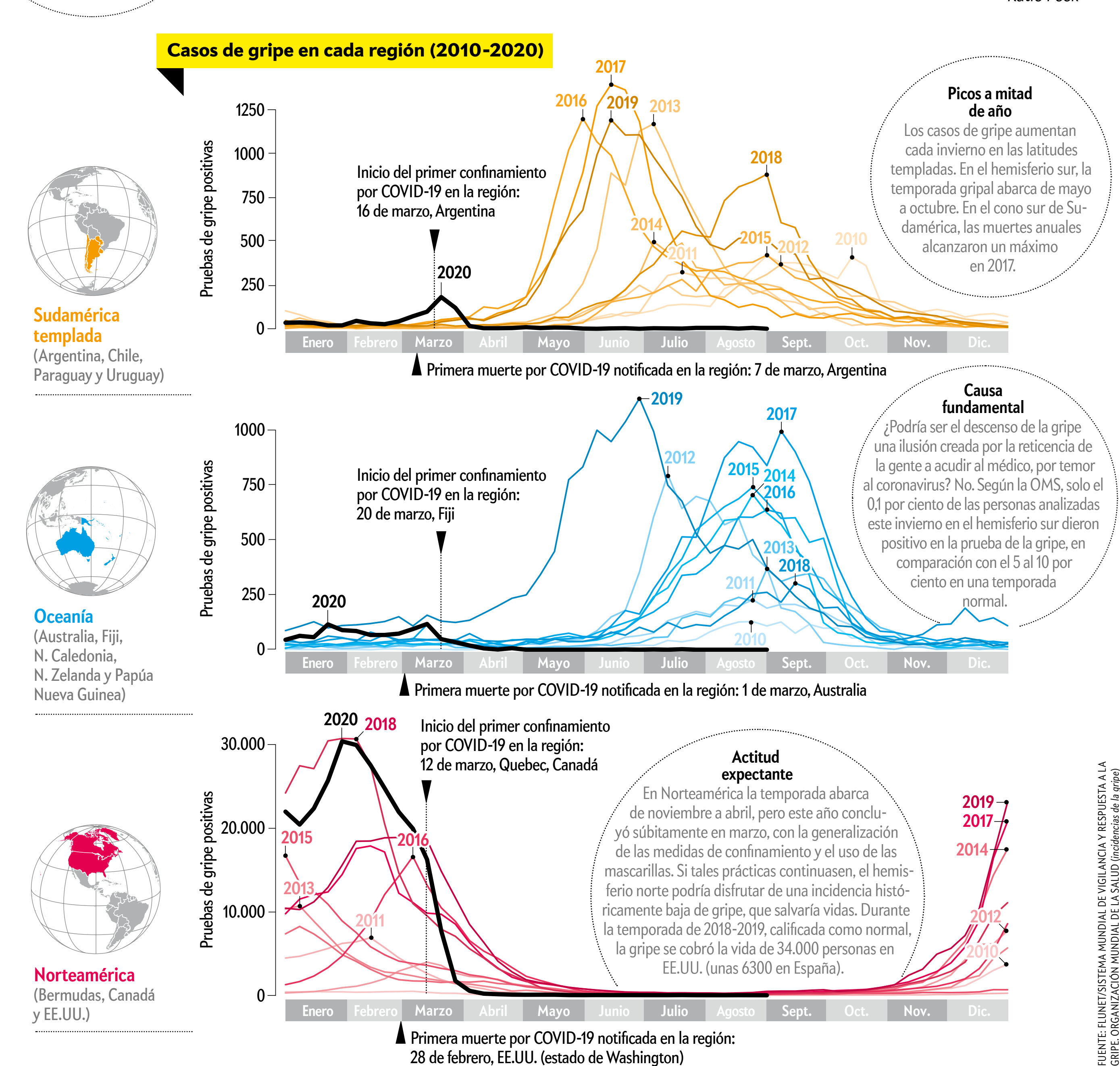
Sin temporada de gripe

Las medidas adoptadas contra la COVID-19 han frenado en seco la gripe en el hemisferio sur

Región a región
La OMS supervisa la actividad de la gripe en 18 zonas de transmisión. Aquí se muestran tres. Solo se contabilizan las personas que han sido analizadas por mostrar síntomas compatibles con la gripe (en torno al 5 por ciento de todas las que enferman).

El pasado marzo, mientras el coronavirus se extendía por el planeta, un dato sanitario menguaba con rapidez: los casos de gripe. La temporada en el hemisferio austral debiera haber comenzado entonces, pero prácticamente no hubo casos. «En 40 años de carrera no había visto nunca cifras tan bajas», asegura Greg Poland, experto en gripe de la Clínica Mayo. Los especialistas siguen estudiando las razones, pero varios han apuntado que las medidas preventivas adoptadas frente al coronavirus (lavado de manos, mascarillas y distanciamiento físico) funcionan contra el contagio de la gripe. De continuar esas medidas, podríamos presenciar el mayor descenso de la incidencia de gripe en la historia moderna. No por ello los expertos en salud dejan de recomendar la vacuna antigripal, pues no todos los ciudadanos cumplen las medidas para contener el virus y porque la COVID-19 tal vez podría ser más peligrosa para quienes contraen la gripe.

—Katie Peek



FUENTE: FLUNET/SISTEMA MUNDIAL DE VIGILANCIA Y RESPUESTA A LA GRIPE. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (*incidencias de la gripe*)

BIOINGENIERÍA

Microbios que fabrican materiales

Una bacteria anaerobia simplifica la síntesis de un prometedor material bidimensional

Los científicos saben desde hace más de un siglo que algunas bacterias son capaces de respirar sin oxígeno, de modo anaerobio, y en los últimos decenios han comenzado a explotar esa propiedad para fabricar materiales útiles. Ahora, los ingenieros eléctricos han encontrado una manera de usar esos microorganismos para producir disulfuro de molibdeno (MoS_2), un material bidimensional que forma láminas de unos pocos átomos de espesor y ofrece potencial para la electrónica del futuro. El hallazgo, publicado en la revista *Biointerphases*, podría servir para sortear un complejo proceso de síntesis que requiere condiciones extremas.

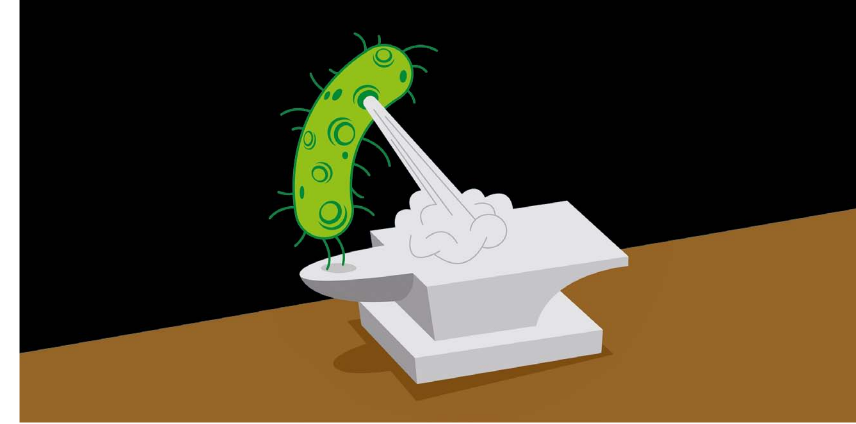
«El grafeno es la estrella indiscutible de los materiales bidimensionales», apunta Shayla Sawyer, ingeniera eléctrica del Instituto Politécnico Rensselaer y autora principal del trabajo. Sin embargo, el MoS_2 es «distinto, porque aporta una nueva "habilidad"». Tanto el grafeno como el MoS_2 son resistentes y flexibles, y se prestan para construir sensores futuristas y sistemas de captación de energía. Pero el grafeno es un conductor eléctrico, mientras que el MoS_2 es un semiconductor, un material cuya conductividad puede manipularse mediante estímulos externos como la luz.

El MoS_2 «también es un poco más versátil desde el punto de vista químico», añade Sawyer. Por ejemplo, es posible alterar la superficie del compuesto para que capture microbios. Sin embargo, es difícil de sintetizar: el proceso puede implicar temperaturas de 200 a 500 grados Celsius y una presión 10 veces mayor que la atmosférica, de acuerdo con Zhi Li, ingeniero de materiales de la Universidad de Alberta que no participó en el estudio.

A fin de evitar ese problema, Sawyer y sus colaboradores han concebido una nueva técnica de síntesis basada en la respiración anaerobia de la bacteria *Shewanella oneidensis*. Al respirar en presencia de aire, este microorganismo transfiere electrones a los átomos de oxígeno. Y en un ambiente anaerobio, puede hacer lo propio con ciertos compuestos metálicos, explica James Dylan Rees, ingeniero bioeléctrico del Instituto Rensselaer y primer firmante del artículo. Tras un proceso de prueba y error para determinar las sustancias metálicas más adecuadas, el equipo las introdujo junto con las bacterias en un recipiente casi sin aire. En el transcurso de dos semanas, las bacterias cedieron sus electrones a estos compuestos y generaron nanopartículas de MoS_2 como subproducto.

Li valora que el nuevo método sugiera una forma sostenible de producir MoS_2 a temperatura ambiente. Pero señala que, para poder usar el material de manera fiable en sensores, baterías y otros dispositivos electrónicos, es importante poder controlar la uniformidad del patrón repetitivo que crean los átomos. Sawyer admite que aún deben trabajar en ese aspecto del proceso, que supone un reto cuando hay microorganismos vivos de por medio. No obstante, asegura que la síntesis de materiales con bacterias tiene un futuro prometedor: «Apenas hemos empezado a vislumbrar lo que puede hacerse».

—*Karen Kwon*



THOMAS FUCHS *(microbio)*; MUSEO DE CIENCIAS NATURALES DE BARCELONA *(abeja)*

AGENDA

CONFERENCIAS VIRTUALES

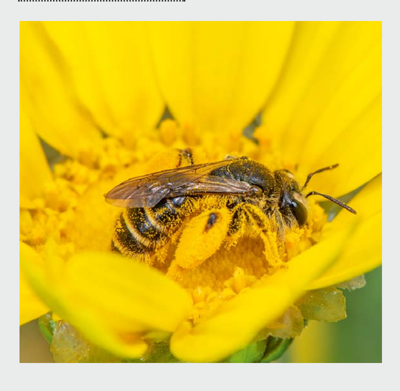
3, 10 y 17 de diciembre — Ciclo
Los orígenes: Del universo a la humanidad
Charlas impartidas por expertos en sus campos
CSIC Valencia
www.csic.es

3, 10 y 17 de diciembre — Ciclo
La materialidad de la memoria: Actualidad arqueológica en Canarias
Charlas impartidas por expertos en el campo
Museo Canario
www.elmuseocanario.com

13 de diciembre
La frontera de la física fundamental
Alberto Casas, CSIC
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
www.fecyt.es

EXPOSICIONES

Más que abejas: Polinizadores y flores, la vida en juego
Jardín Botánico
Barcelona
museuciencies.cat



Músicaconciencia
Museo de la Ciencia
Valladolid
www.museocienciavalladolid.es

OTROS

Hasta el 15 de diciembre
De mayor quiero ser como…
Concurso de vídeos para estudiantes de secundaria de la Comunidad Valenciana
Convoca: Fundación Fisabio
blogs.fisabio.san.gva.es/demajorvullsercom

Hasta el 31 de enero de 2021
LIMA&U 2020
Concurso de fotografía y vídeo para estudiantes de secundaria
Convoca: Sociedad Española de Óptica
www.sedoptica.es

ASTRONOMÍA

La mayor colisión de agujeros negros observada hasta la fecha

Una nueva detección de ondas gravitacionales revela la existencia de agujeros negros con masas consideradas «prohibidas» por los modelos al uso

DAVIDE CASTELVECCHI



¿CÓMO SE FORMARON? Los detectores de ondas gravitacionales LIGO, en EE.UU., y Virgo, en Italia, han observado una colisión de dos agujeros negros (*imagen, recreación artística*) con masas respectivas de 66 y 85 masas solares. Sin embargo, los modelos de evolución estelar predicen que los agujeros negros con masas comprendidas entre 65 y 120 masas solares nunca deberían llegar a formarse. El origen de estos colosos intriga a los astrónomos.

MARK MYERS/ARC CENTRE OF EXCELLENCE FOR GRAVITATIONAL WAVE DISCOVERY (OZGRAV)

Los astrónomos han detectado la colisión de agujeros negros más lejana, potente y desconcertante observada hasta ahora. El suceso en cuestión habría ocurrido cuando el universo tenía la mitad de su edad actual, y al menos uno de los dos colosos, cuya masa se ha estimado en 85 masas solares, tenía una masa mayor de la que hasta ahora se creía posible para un fenómeno de ese tipo. Además, la fusión de ambos astros dio lugar a un agujero negro de casi 150 masas solares, lo que lo sitúa en un intervalo de masas para el que nunca antes se habían detectado agujeros negros de forma concluyente.

«Todo lo relacionado con este descubrimiento es sobrecogedor», señala Simon Portegies Zwart, astrofísico computacional de la Universidad de Leiden. El investigador enfatiza que, entre otras cosas, el hallazgo confirma la existencia de los llamados «agujeros negros de masa intermedia»: astros considerablemente más masivos que una estrella típica pero menores que los agujeros negros supermasivos que ocupan el centro de las galaxias. Ilya Mandel, astrofísico teórico de la Universidad Monash, en Melbourne, califica el hallazgo de «maravillosamente inesperado».

El fenómeno, descrito por los científicos en dos artículos publicados el pasado 2 de septiembre, fue detectado el 21 de mayo de 2019 por los dos detectores gemelos del Observatorio de Ondas Gravita-

torias por Interferometría Láser (LIGO), en EE.UU., y por el observatorio Virgo, algo menor que los anteriores y emplazado en Italia. La onda gravitacional ha sido bautizada como GW190521, un nombre que refiere a la fecha en que se produjo la detección.

Masas «prohibidas»

Desde 2015, las colaboraciones LIGO y Virgo han transformado la astronomía gracias a la detección de ondas gravitacionales, ondulaciones del espaciotiempo predichas por la teoría de la relatividad general de Albert Einstein y capaces de revelar cataclismos astrofísicos que, como ocurre con las colisiones de agujeros negros, resultan invisibles para los telescopios ordinarios.

A partir de las propiedades de las ondas detectadas, los investigadores pueden reconstruir las características de los astros que colisionaron, como sus respectivas masas y otras propiedades. En los últimos años, estos trabajos han revolucionado el estudio de los agujeros negros gracias a la detección de decenas de estos objetos. Pero, hasta ahora, las masas de los astros observados se habían situado entre unas pocas masas solares y unas 50 veces la masa del Sol.

Tales valores resultan compatibles con lo que cabe esperar a partir del proceso «normal» de formación de un agujero negro, el cual tiene lugar cuando una estrella de gran masa agota su combustible y acaba colapsando sobre sí misma por efecto de su propia gravedad. Sin embargo, la teoría que describe tales procesos predice que estos no deberían producir agujeros negros con masas comprendidas entre unas 65 y unas 120 masas solares.

La razón de este «hueco» se debe a que, hacia el final de su vida, las estrellas pertenecientes a cierto intervalo de masas alcanzan temperaturas tan elevadas en su núcleo que comienzan a convertir fotones en pares de partículas y antipartículas, un proceso conocido como «inestabilidad de pares». Eso desencadena una violenta reacción explosiva que acaba dispersando por completo la estrella, la cual se desvanece sin dejar ningún objeto compacto tras de sí.

En esta ocasión, los detectores de LIGO y Virgo solo detectaron cuatro pulsos cuya frecuencia aumentó de 30 a 80 hercios en una décima de segundo. Según los modelos, dichos pulsos habrían correspondido al momento en que los dos agujeros negros se precipitaban uno contra otro siguiendo una órbita en espiral. Los agujeros negros de menor masa continúan emitiendo ondas hasta alcanzar frecuencias mayores. Pero los más masivos chocan y se fusionan antes, por lo que su señal bordea el límite inferior de frecuencias a las que son sensibles los detectores.

Los análisis posteriores estimaron que los astros que colisionaron tenían unas masas respectivas de en torno a 66 y 85 masas solares. Tales valores «encajan con claridad en el intervalo prohibido por la inestabilidad de pares», explica Christopher Berry, astrofísico de la Universidad Noroccidental de EE.UU. y miembro de LIGO.

De hecho, Selma de Mink, astrofísica de Harvard, pone el límite de masas asociado a la inestabilidad de pares aún más bajo, tal vez en unas 45 masas solares. Ello supondría que también el segundo objeto tendría una masa perteneciente al intervalo de masas consideradas prohibidas. «En mi opinión, ambos agujeros negros tienen una masa incómodamente elevada», enfatiza la experta.

Agujeros negros anómalos

Los investigadores han considerado distintas hipótesis para explicar las observaciones, incluida la posibilidad de que ambos objetos hayan existido desde el principio de los tiempos. Hace décadas que los físicos barajan la existencia de agujeros negros «primordiales»: objetos que se habrían formado de manera espontánea momentos después de la gran explosión que dio origen al universo, y que en principio podrían abarcar un amplio abanico de masas.

Con todo, el escenario principal contemplado por los científicos es que los agujeros negros que colisionaron eran tan masivos porque ellos mismos eran, a su vez, el resultado de una fusión previa de agujeros negros. Los agujeros negros producidos por el colapso de estrellas deberían abundar en los cúmulos estelares densos, por lo que serían propensos a experimentar fusiones repetidas. No obstante, también esta posibilidad adolece de sus propios problemas, ya que, tras una primera fusión, lo más normal sería que el agujero negro resultante se viera impulsado por las ondas gravitacionales generadas y saliese despedido del cúmulo. Solo en muy raras ocasiones permanecería en la zona donde podría sufrir una segunda colisión.

Al respecto, De Mink señala que tales fusiones repetidas serían más probables para aquellos agujeros negros situados cerca de un centro galáctico, donde la gravedad sí sería lo suficientemente intensa como para retener el astro.

Los investigadores ignoran en qué galaxia concreta se produjo la fusión. Sin embargo, un mes después de la detección de GW1905213, un equipo de investigadores observó una fulguración en un cuásar (un núcleo galáctico activo con un agujero negro supermasivo en su centro) en aproximadamente la misma región del cielo. Dicha fulguración podría haberse debido a la onda de choque causada por el agujero negro resultante de la colisión cuando salió despedido, aunque la mayoría de los astrónomos se muestran cautelosos a la hora de relacionar ambos eventos.

En lo que va de año, ya es la segunda vez que las colaboraciones LIGO y Virgo detectan agujeros negros con una masa supuestamente «prohibida». El pasado mes de junio, los investigadores describieron la fusión de un astro de unas 2,6 masas solares: demasiado ligero para ser un agujero negro, pero demasiado masivo para ser una estrella de neutrones.

Davide Castelvecchi *es periodista especializado en física, astronomía y matemáticas de la revista* Nature.

Artículo original publicado en *Nature* vol. 585, págs. 171-172, septiembre de 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

GW190521: A binary black hole merger with a total mass of 150 $M_\odot$. R. Abbot et al. en *Physical Review Letters*, vol. 125, art. 101102, septiembre de 2020.

Properties and astrophysical implications of the 150 $M_\odot$ binary black hole merger GW190521. R. Abbot et al. en *Astrophysical Journal Letters*, vol. 900, art. L13, septiembre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Agujeros negros de masa intermedia. Jenny E. Greene en *IyC*, marzo de 2012.

Super supernovas. Avishay Gal-Yam en *IyC*, agosto de 2012.

La observación de ondas gravitacionales con LIGO. Alicia M. Sintes y Borja Sorazu en *IyC*, febrero de 2017.

EVOLUCIÓN ANIMAL

El ADN antiguo revela la evolución de los perros en los últimos 11.000 años

Gracias al estudio de los genomas podemos ver cómo se han desplazado estos animales por el mundo, a menudo acompañando a los humanos

EWEN CALLAWAY


GETTY IMAGES/ONFOKUS/ISTOCK

LOS PERROS CANTORES de Nueva Guinea están emparentados con los dingos australianos, como el de la imagen.

La historia de los humanos está entrelazada con la de los perros. El estudio más extenso realizado hasta la fecha sobre genomas antiguos de estos animales sugiere que, allá donde iban los humanos, también iban sus amigos de cuatro patas. Hasta cierto punto. La investigación también ha identificado cambios regionales importantes de los antepasados de los humanos que influyeron muy poco en las poblaciones de perros, y también épocas en las que los perros cambiaron, pero sus dueños no.

El análisis de más de dos docenas de perros euroasiáticos también sugiere que los animales fueron domesticados y se extendieron por todo el mundo hace más de 11.000 años. Pero no determina cuándo o dónde se produjo la domesticación de los lobos, un tema que ha irritado a los investigadores y que en ocasiones ha desatado acalorados debates.

«Los perros son como un colorante de contraste que ayuda a trazar la historia humana», señala Pontus Skoglund, genetista de poblaciones del Instituto Francis Crick en Londres, quien codirigió el estudio que se publicó en octubre en *Science*. «En ocasiones, es posible que el ADN humano no muestre partes de la prehistoria que sí podemos observar en los genomas de los perros.»

Hasta hace unos pocos años, la historia genética canina se basaba en gran parte en el estudio del ADN de los perros actuales. Pero este ofrecía una imagen algo confusa porque una buena parte de la diversidad genética de los primeros perros se perdió, probablemente, cuando se empezaron a crear las razas modernas. Los primeros estudios sobre los genomas antiguos de perro empezaron a insinuar la existencia de cambios que se habían producido en las poblaciones caninas. Pero, con tan solo seis genomas antiguos de perros o lobos disponibles hasta ahora, esas conclusiones habían sido preliminares.

Compañeros durante la historia

Para expandir el acervo de ADN antiguo de perro, el laboratorio de Skoglund reunió al equipo de Greger Larson, genetista evolutivo de la Universidad de Oxford, y al del arqueólogo Ron Pinhasi, de la Universidad de Viena. Juntos, secuenciaron 27 genomas antiguos de perro. Las muestras procedían de Europa, Oriente Medio y Siberia, y sus antigüedades iban de los 100 a los 11.000 años.

Al trazar un modelo de las relaciones intra e intergrupales de perros antiguos y modernos, los investigadores determinaron que un perro de Rusia de 10.900 años de antigüedad era diferente a cualquier perro antiguo más tardío de Europa, Oriente Medio, Siberia o América, y también difería de los miembros de un linaje canino que dio lugar a los modernos perros cantores de Nueva Guinea (los cuales están emparentados con los dingos australianos). «Entonces, hace 11.000 años, existían al menos cinco grupos de perros en todo el mundo, por lo que el origen de estos debió de ser sustancialmente anterior a esa fecha», explica Skoglund.

Con tantos genomas disponibles, los investigadores pudieron seguir el recorrido de las poblaciones caninas antiguas a medida que se desplazaban y mezclaban, y comparar estos desplazamientos con los de las poblaciones humanas. En ocasiones, los viajes de los perros eran paralelos a los de los humanos. Cuando los agricultores de Oriente Medio se empezaron a

expandir hacia Europa, hace 10.000 años, se llevaron con ellos a sus perros, y los animales —al igual que sus dueños— se mezclaron con las poblaciones locales. Los perros antiguos de Oriente Medio que vivieron hará unos 7000 años están relacionados con los perros modernos del África subsahariana, lo cual tiene que ver con el regreso de los humanos a África, algo que ocurrió más o menos en la misma época.

Pero las historias de humanos y perros no siempre se han superpuesto. La llegada masiva de personas de las estepas de Rusia y Ucrania hace 5000 años posibilitó que se produjera un cambio duradero en la composición genética de los humanos europeos, pero no en sus perros. El estudio también reveló que el linaje de los perros europeos se volvió menos variado en los últimos 4000 años, un período en el que el muestreo detallado del ADN de los humanos antiguos ha demostrado que estos apenas se desplazaron.

Perros errantes

La causa de esta desconexión es un misterio, afirma Angela Perri, zooarqueóloga de la Universidad Durham. «¿Fue producto de la introducción de una enfermedad, de una preferencia cultural o de un cambio de costumbres?», se pregunta. «Probablemente, se trata de cuestiones culturales que el ADN no puede revelar.»

Los desplazamientos humanos y las preferencias culturales no son las únicas posibles explicaciones del cambio producido en el linaje de los perros, afirma Elinor Karlsson, genetista evolutiva de la Facultad de Medicina de la Universidad de Massachusetts en Worcester. «Seguramente, los perros empezaron a aprovecharse de los humanos porque suponían un recurso que les ayudaba a sobrevivir», afirma Karlsson. Los perros debieron de poder desplazarse libremente, siguiendo a los humanos o moviéndose entre grupos cuando convenía a sus intereses.

El biólogo evolutivo Robert Wayne, de la Universidad de California en Los Ángeles, cree que este análisis a gran escala de los genomas antiguos de perro es un avance importante. Los esfuerzos para determinar, de forma inequívoca, los orígenes de los perros domésticos necesitarán adoptar el mismo enfoque, añade. «Va a ser necesario un muestreo exhaustivo de lobos y perros de toda la historia de la domesticación del perro.»

Si no podemos contar con un gran número de genomas tanto de perros como de lobos aún más antiguos, «será muy difícil determinar cómo se produjo esa conquista inicial del mundo», señala Skoglund.

Ewen Callaway *es periodista especializado en biomedicina en* Nature.

Artículo original publicado en Nature.com el 29 de octubre de 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Origins and genetic legacy of prehistoric dogs. Anders Bergström et al. en *Science*, vol. 370, págs. 557-564, octubre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Origen de los perros del Nuevo Mundo. Proceden de los euroasiáticos. Jennifer Leonard y Carles Vilà en *IyC*, febrero de 2004.

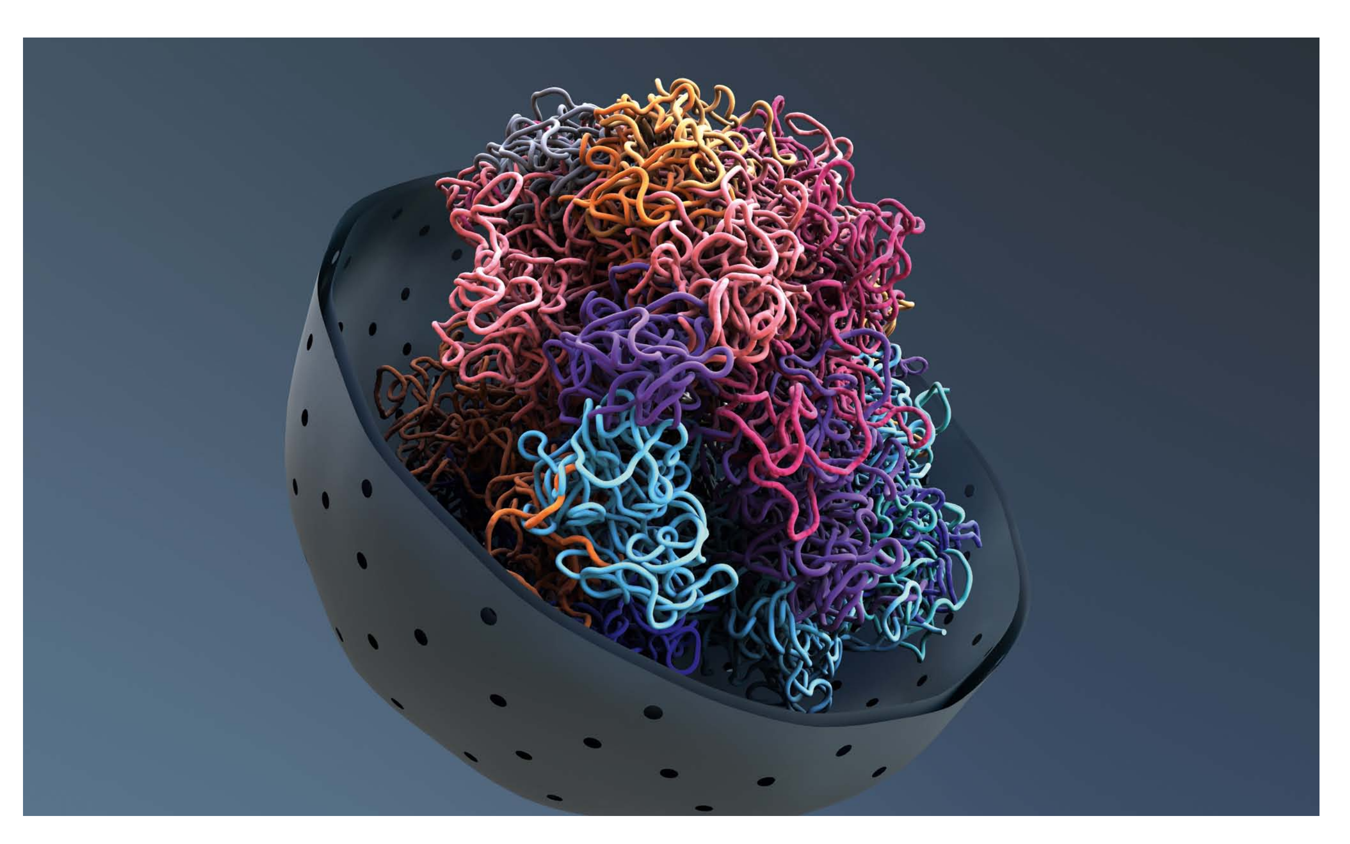
Del lobo al perro. Virginia Morell en *IyC*, septiembre de 2015.

GENÓMICA

Las secuencias reguladoras del genoma, a mayor detalle

La tercera fase del proyecto ENCODE ha generado el catálogo más exhaustivo conocido hasta ahora de los elementos funcionales que regulan los genes

CHUNG-CHAU HON Y PIERO CARNINCI



GETTY IMAGES/DESIGN CELLS/ISTOCK

EN EL INTERIOR DEL NÚCLEO, la cromatina (complejo formado por ADN y proteínas) está muy enrollada y presenta numerosos bucles. El proyecto ENCODE ha caracterizado ahora la formación de estos bucles, que acaban acercando entre sí las secuencias encargadas de la regulación de los genes. (*Los colores representan distintos cromosomas*).

La proporción del genoma humano que codifica proteínas no llega al 2 por ciento. El restante 98 por ciento corresponde a regiones que establecen la intensidad con la que se expresan los genes, lo que se conoce como elementos funcionales. La cartografía de estos elementos ha supuesto un gran desafío para las ciencias genómicas. El proyecto ENCODE (acrónimo inglés de «Enciclopedia de los Elementos del ADN»), entre otras grandes iniciativas colaborativas, arrancó en 2003 para empezar a catalogarlos y tener una idea general de cómo intervienen en la regulación de la expresión génica. El pasado julio, en nueve artículos publicados en *Nature*, el consorcio ENCODE nos dio a conocer la tercera fase de su valioso proyecto.

En 2007 concluyó la fase piloto en la que se buscaron los elementos funcionales en el 1 por ciento del genoma de unas pocas líneas celulares y se catalogaron en dos tipos. Para el primero, identificaron las regiones del ADN que se transcriben en algún tipo de ARN (codifique o no una proteína). Para el segundo, establecieron las regiones que regulaban la transcripción génica, los denominados elementos reguladores en *cis* (CRE, por sus siglas en inglés). Estos se caracterizan por estar accesibles a las enzimas que cortan el ADN, como la ADNasa I; por fijar proteínas, como los factores de transcripción; o por presentar modificaciones moleculares específicas en las histonas (proteínas a las que se fija el ADN en un complejo denominado cromatina).

En 2012, la segunda fase del proyecto ENCODE amplió la búsqueda de estos elementos funcionales a todo el genoma de más líneas celulares humanas, con lo que se sentaron unos cimientos sólidos para la enciclopedia. En 2014 se extendieron los estudios al ratón y así se aportó la perspectiva evolutiva a los elementos funcionales.

En la tercera, y actual, fase del proyecto, se ha pasado de las líneas celulares a las células tomadas directamente de tejidos humanos y murinos, lo que ha dota-

do a la enciclopedia de mayor relevancia biológica. También comenzaron a investigarse otros aspectos más amplios de los elementos funcionales, como la caracterización de los elementos contenidos en los ARN o la formación de bucles (o lazos) de cromatina que acaban acercando los CRE alejados encargados de la regulación de un gen.

Bucles de cromatina

En el artículo principal, el consorcio del proyecto ENCODE ofrece un panorama de la actualización de la enciclopedia, que contiene nuevos datos recién añadidos de unos 6000 experimentos realizados con unas 1300 muestras. Al integrarlo todo, han creado un registro digital de los candidatos a CRE (cCRE). La gran mayoría se clasifican como promotores o como potenciadores (ubicados, respectivamente, en la posición del genoma en la que comienza la transcripción de un gen y en una posición más alejada de esta). En numerosas muestras de tejido, el consorcio rastreó la actividad de cada cCRE con las proteínas que se le fijan. Se utilizaron los datos de formación de bucles de cromatina para conectar los potenciadores con los genes que se supone que regulan. Este registro digital marca un verdadero hito al convertir una abrumadora cantidad de información genómica en una enciclopedia donde los CRE se pueden buscar, filtrar y recuperar.

Los otros artículos que acompañan al artículo principal profundizan en los fundamentos biológicos que respaldan este proyecto. En ellos se saca provecho de la escala y variedad de los conjuntos de datos de ENCODE para revelar los principios que rigen el funcionamiento de los elementos funcionales. En conjunto, demuestran lo importante que es para la biología la generación de datos a gran escala.

Para identificar los CRE, Wouter Meuleman, del Instituto Altius de Ciencias Biomédicas, en Seattle, y sus colaboradores midieron la sensibilidad a la ADNasa I por todo el genoma y definieron así 3,6 millones de regiones accesibles en el ADN de 438 tipos y etapas de células y tejidos. En el mismo instituto, Jeff Vierstra, del mismo instituto, y sus colaboradores examinaron además los patrones de corte de la ADNasa I para conocer cómo se fijan los factores de transcripción a los CRE, y así concluir que la mayoría están ocupados por varios factores de transcripción de una manera independiente y bien espaciada.

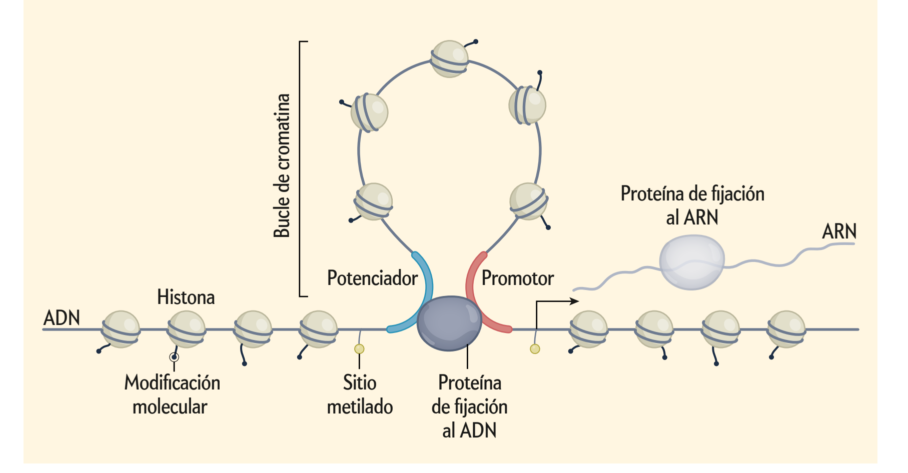
Para entender mejor la cooperación de los factores de transcripción en los CRE, E. Christopher Partridge, del Instituto de Biotecnología HudsonAlpha, en Alabama, y sus colaboradores cartografiaron la fijación de 208 proteínas (entre ellas, 171 factores de transcripción) por todo el genoma de una línea celular de hígado humano. Al abarcar una cuarta parte de las proteínas hepáticas que se fijan a la cromatina, nos encontramos ante una cobertura sin precedentes. Destacan unas 5000 regiones «calientes», o HOT (del inglés *highly occupied target*: dianas muy ocupadas), en su mayoría promotores y potenciadores, a las que se fijan numerosos factores de transcripción.

Estas regiones ya se habían descrito antes, pero gracias al análisis de las pautas mediante las que se ensamblan las proteínas en estas mismas posiciones, así como de las secuencias de ADN a las que se fijan, ahora se ofrecen los primeros datos exhaustivos que han permitido proponer un modelo para la formación de las regiones calientes. En él, un conjunto de secuencias de ADN de anclaje facilita la incorporación de los factores de transcripción específicos, los cuales incrementan la accesibilidad de esta cromatina y sirven de semilla sobre la que se agregarán otras proteínas cuya fijación no depende de la secuencia del ADN. Todo ello ocurrirá gracias a que las interacciones entre proteínas generarán los bucles de cromatina que acercarán los CRE alejados.

Para conocer mejor cómo cooperan los CRE alejados, Fabian Grubert, de la Universidad Stanford, y sus colaboradores localizaron los bucles de cromatina en 24 tipos de células humanas. Demostraron que la distinta configuración de los bucles entre tipos de células afectaba a la expresión génica, porque hacía cambiar los potenciadores alejados que acababan regulando un gen, así como los tramos que se conservaban después de la transcripción (un proceso denominado ayuste, o *splicing*, alternativo). Su hallazgo más sorprendente fue que los genes de mantenimiento (los que se encargan del funcionamiento básico de las células) a menudo interaccionan solo con unos pocos potenciadores, mientras que son muchos los potenciadores que entran en contacto con los genes que provocan enfermedades cuando una de las dos copias está mutada. Esto implica que la expresión estable y constante se ve favorecida por los circuitos sencillos, mientras que se necesitan circuitos más complejos para salvaguardar la expresión de los genes «sensibles a la dosis».

ORGANIZACIÓN Y REGULACIÓN DEL GENOMA

EN LA TERCERA FASE DEL PROYECTO, se han descrito y clasificado numerosos aspectos de la organización y de la regulación del genoma: se ha generado un catálogo de elementos reguladores en *cis* (CRE), que son secuencias de ADN denominadas promotores y potenciadores que regulan la transcripción (*flecha negra*) de los genes cercanos o distantes, respectivamente; se han analizado las secuencias de ADN y de ARN, así como las proteínas que se les fijan (incluidas las histonas, en torno a las cuales el ADN se empaqueta para formar la cromatina); y se han estudiado las modificaciones moleculares del ADN y de las histonas, como la metilación. Estas modificaciones inducen cambios de regulación génica y de formación de bucles de cromatina para acercar los potenciadores a los genes que han de regular.



En otros tres artículos se explora la función reguladora de los CRE desde el punto de vista del desarrollo, con el análisis de numerosos tejidos de fetos murinos a lo largo de las etapas del desarrollo. Yupeng He, del Instituto Salk de Estudios Biológicos, en California, y sus colaboradores examinaron los patrones de modificación del ADN por metilación; David U. Gorkin, del Instituto Ludwig de Investigación Oncológica, en California, y sus colaboradores investigaron la modificación de las histonas y la accesibilidad de la cromatina en tejidos enteros; y Peng He, del Instituto Europeo de Bioinformática, en Cambridge, y sus colaboradores analizaron el perfil de expresión génica célula a célula.

Los dos primeros estudios revelan un principio general de la regulación génica durante el desarrollo: se produce una retirada continuada de los grupos metilo que promueven el silenciamiento génico estable para posibilitar los modos de regulación génica rápidos y flexibles, controlados por la modificación de las histonas y la accesibilidad de la cromatina. Sorprendentemente, ambos grupos demostraron que los equivalentes humanos de algunos elementos potenciadores de ratón (los que están activos solo en determinados tejidos) tienen más variantes genéticas asociadas a enfermedades relevantes de dicho tejido. Esta observación destaca la importancia de conocer los CRE de los animales.

En el tercer estudio, Peng He y sus colaboradores explotaron la resolución de los datos de expresión de cada célula para «descomponer» computacionalmente los resultados del tejido completo obtenidos en los primeros dos artículos. De este modo, se podría predecir qué elementos potenciadores están activos en cada tipo de célula de un tejido. Se trata de una demostración perfecta de cómo los análisis integradores realzan el valor de los datos de numerosos estudios.

Finalmente, Eric L. Van Nostrand, de la Universidad de California en San Diego, y sus colaboradores presentan un análisis completo de los elementos funcionales en el ARN al integrar con elegancia numerosos ensayos. Analizaron in vitro las secuencias de ARN a las que se adherían las proteínas que se fijan a dicho ácido nucleico. Luego lo usaron para interpretar los resultados de otro trabajo donde se identificaron in vivo las secuencias de ARN a las que se adherían dichas proteínas. Para profundizar en cómo afecta esto a los genes (en términos de nivel de expresión y patrones de ayuste alternativo), integraron la información de la fijación con ensayos de perfiles de expresión génica en las células donde se inhibieron determinadas proteínas de fijación al ARN. Se puso así de manifiesto la posible función que algunos elementos del ARN tienen sobre su estabilidad y el ayuste alternativo.

Un hallazgo sorprendente fue que casi la mitad de las proteínas que se fijaban al ARN interaccionaban también con el ADN. Sin embargo, los autores encontraron pocas pruebas de que la fijación se produjera sobre la misma secuencia. Esto sugiere que los ARN recién sintetizados en cada sitio de la cromatina no parecen intervenir en la interacción con el ADN que presentan la mayoría de las proteínas de fijación al ARN. Se necesitan más estudios para valorar si la interacción ocurre por unión directa, o si está mediada, ya sea por otras proteínas de fijación al ADN, o bien por los ARN que se fijan a la cromatina lejos de donde se sintetizaron.

Integración con otros proyectos

Este catálogo de elementos en el ARN expande sustancialmente nuestro conocimiento sobre los componentes del genoma humano que se dedican a la regulación. Los investigadores podrán predecir las variantes genéticas que alterarían el procesamiento del ARN, y constituirá un recurso inestimable para explorar la regulación de las interacciones entre las proteínas y el ARN.

La tercera fase del proyecto ENCODE representa toda una hazaña. Pero dado que muchos elementos reguladores actúan solo en determinados tipos celulares o en momentos concretos, no se puede valorar con precisión si la enciclopedia está completa. Será interesante ver cómo consiguen incorporar al proyecto las técnicas con células individuales para extraer los elementos dedicados a la expresión espaciotemporal y así desvelar más datos sobre los fundamentos de la regulación génica. También nos encantaría ver la convergencia del proyecto ENCODE con otras investigaciones colaborativas con las que se solapan los objetivos, como el Atlas de las Células Humanas (que persigue mapear la expresión génica en todas las células del cuerpo humano) y el proyecto del nucleoma 4D (que aspira a conocer la organización 3D de los cromosomas en diferentes momentos y en distintos tipos de células). La integración de los datos relevantes de estos proyectos en la enciclopedia ampliaría aún más su cobertura.

Aunque todavía incompleta, esta enciclopedia ya se ha convertido en la herramienta por antonomasia para estudiar la regulación génica y la predisposición genética a las enfermedades. En la próxima cuarta fase del proyecto ENCODE esperamos la valoración sistemática de los CRE catalogados hasta ahora para saber si realizan las funciones inferidas a partir de las modificaciones de las histonas y de las proteínas que se les fijan; esto podría hacerse realidad con las técnicas de genómica funcional de alto rendimiento. La expansión continua de ENCODE a contextos biológicos más amplios (como a muestras de enfermedades y tipos de células infrecuentes) a resolución unicelular servirá para que los investigadores utilicen la información genómica en el diagnóstico y prevención de las enfermedades.

Chung-Chau Hon *y* ***Piero Carninci***
son investigadores del Centro RIKEN para Ciencias Médicas Integradoras, en Yokohama.

Artículo original publicado en *Nature* vol. 583, págs. 685-686, 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Identification and analysis of functional elements in 1% of the human genome by the ENCODE pilot project. Ewan Birney et al. en *Nature*, vol. 447, págs. 799-816, junio de 2007.

An integrated encyclopedia of DNA elements in the human genome. Ian Dunham et al. en *Nature*, vol. 489, págs. 57-74, septiembre de 2012.

Expanded encyclopaedias of DNA elements in the human and mouse genomes. Jill E. Moore et al. en *Nature*, vol. 583, págs. 699-710, julio de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

La vida interior del genoma. Tom Misteli en *IyC*, abril de 2011.

La función reguladora del genoma. Rafael R. Daga, Silvia Salas-Pino y Paola Gallardo en *IyC*, diciembre de 2013.

Viaje al interior del genoma. Stephen S. Hall en *IyC*, diciembre de 2012.

Desenredar el genoma. Erez Lieberman Aiden en *IyC*, mayo de 2019.



ASTRONOMÍA

Intrusos

El reciente avistamiento de dos rocas espaciales procedentes de fuera



1I/'OUMUAMUA, el primer objeto interestelar observado en el sistema solar, pasó cerca de la Tierra en 2017.

interestelares

del sistema solar ha desconcertado a los astrónomos

David Jewitt y Amaya Moro Martín

Ilustraciones de Ron Miller



David Jewitt es astrónomo en la Universidad de California en Los Ángeles, donde estudia los cuerpos primitivos del sistema solar y de más allá de él.

Amaya Moro Martín es astrónoma en el Instituto para la Ciencia del Telescopio Espacial, en Baltimore. Investiga sistemas planetarios y cometas extrasolares.

A última hora de la tarde del 24 de octubre de 2017, uno de nosotros (Jewitt) recibió un correo electrónico con emocionantes noticias sobre el cielo. El astrónomo Davide Farnocchia, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, escribía acerca de un nuevo objeto espacial que presentaba una trayectoria muy extraña. Descubierto seis días antes por el astrónomo de la Universidad de Hawái Robert Weryk, el objeto, inicialmente apodado P10Ee5V, viajaba demasiado rápido para que el Sol pudiera mantenerlo en órbita. En vez de describir una elipse cerrada, los cálculos sugerían que su órbita era abierta, lo que implicaba que nunca regresaría. «Aún necesitamos más datos», admitía Farnocchia, «pero su órbita parece hiperbólica». Horas después, Jewitt escribió a Jane Luu, una colaboradora habitual con contactos en Noruega, acerca de la posibilidad de estudiar el objeto con el Telescopio Óptico Nórdico, ubicado en la isla canaria de La Palma. Muchos otros observatorios de todo el mundo se afanaban por localizarlo.

Y así dio comienzo una nueva era en la astronomía. El objeto, rebautizado primero como C/2017 U1 (donde la *C* significaba «cometa»), más tarde como A/2017 U1 (con *A* de «asteroide») y por último como 1I/‘Oumuamua, resultó ser el primer cuerpo observado en el sistema solar que se había originado fuera de él. El «1I» de su nombre indica su condición oficial de primer objeto interestelar conocido, y el apelativo ‘Oumuamua («mensajero lejano que llega primero», en hawaiano) fue propuesto por Weryk y sus colaboradores, quienes descubrieron el cuerpo con el telescopio Pan-STARRS, en la isla hawaiana de Maui.

Lo primero que llamó la atención de los observadores fue la enorme velocidad del objeto con respecto al Sol. Tras computar la atracción gravitatoria ejercida por nuestra estrella, ‘Oumuamua presentaba un exceso de velocidad de unos 26 kilómetros por segundo (94.000 kilómetros por hora). Ninguna interacción con un cuerpo del sistema solar conseguiría generar semejante impulso, y la gravedad del Sol no puede atrapar un objeto que se mueve tan deprisa: ‘Oumuamua tenía que venir del exterior.

¿Qué viaje habrá realizado este objeto? Por lo que sabemos, podría haber estado vagando por la galaxia durante cientos de millones de años. Las observaciones apuntan a que vino desde la dirección de Vega, una estrella brillante de la constelación de la Lira. No obstante, Vega habría ocupado una posición distinta cuando ‘Oumuamua estuvo allí, hace unos 300.000 años.

Aunque los astrónomos sospechaban desde hacía tiempo que había cuerpos interestelares atravesando el sistema solar, hallar uno supuso una verdadera sorpresa. Solo un año antes, un

EN SÍNTESIS

En los últimos años hemos descubierto dos objetos llegados al sistema solar desde fuera de él: 1I/‘Oumuamua y 2I/Borisov, nuestros primeros visitantes interestelares conocidos.

Borisov es similar a un cometa ordinario, pero ‘Oumuamua es muy alargado y parece impulsado por una fuerza no gravitatoria (pese a no mostrar emisión de gas), lo que ha llevado a los científicos a proponer diversas teorías sobre su naturaleza.

Hay razones para pensar que pronto observaremos decenas de objetos interestelares, gracias a nuevos telescopios o incluso a naves espaciales que puedan acudir a su encuentro.


2I/BORISOV, el segundo visitante interestelar que hemos identificado, se observó por primera vez en 2019.

análisis exhaustivo realizado por Toni Engelhardt, por entonces en la Universidad de Hawái, y sus colaboradores concluía que las perspectivas de identificar un intruso interestelar «parecían desalentadoras»: se pensaba que eran demasiado pequeños y tenues para que pudiéramos albergar esperanzas de encontrarlos. Sin embargo, a medida que fuimos conociendo más detalles de ‘Oumuamua, la sorpresa dio paso al desconcierto. Todas sus propiedades, desde su forma y su tamaño hasta su disparidad con los cometas, contradecían nuestras expectativas. Si se trataba de un visitante típico del gran universo, nos quedaba mucho por aprender.

UN OBJETO SINGULAR

Las observaciones del Telescopio Óptico Nórdico y otros instrumentos pronto mostraron que ‘Oumuamua no poseía las características distintivas de un cometa: una cola y una coma envolvente de polvo y hielo sublimado (en transición directa de sólido a gas). Salvo por su singular órbita, se asemejaba más a un asteroide rocoso. Aun así, dado que procedía del espacio interestelar, donde la temperatura media es de tan solo unos pocos grados por encima del cero absoluto, la aparente ausencia de hielo en proceso de sublimación resultaba desconcertante: habría cabido esperar la presencia de agua, la molécula más abundante del universo después del hidrógeno molecular.

Y luego estaba la forma del objeto. Los astrónomos determinan el tamaño de los asteroides a partir de su brillo, puesto que los cuerpos más grandes reflejan más luz solar hacia nuestro planeta. El brillo medio de ‘Oumuamua indicaba un diámetro de unos 100 metros, bastante pequeño en comparación con la mayoría de los asteroides conocidos. De hecho, si ‘Oumuamua se hubiera encontrado a la distancia del cinturón de asteroides, donde residen la mayoría de los asteroides de nuestro sistema solar, nunca lo habríamos visto. Sin embargo, tuvimos la suerte de que pasara muy cerca de nosotros: a unos 60 millones de kilómetros, el 40 por ciento de la distancia media entre el Sol y la Tierra.

Los asteroides rotan en el espacio, de modo que su brillo suele variar de manera cíclica, a medida que muestran a la Tierra caras más grandes y más pequeñas. La observación de ese giro permite obtener una «curva de luz», una gráfica que recoge los cambios en la luz reflejada y revela el periodo de rotación del asteroide y sus dimensiones aproximadas. En diciembre de 2017, los científicos publicaron la curva de luz de ‘Oumuamua. Su periodo de unas ocho horas no tenía nada de especial frente al de los asteroides del sistema solar. Sin embargo, mientras el brillo de la mayoría de los asteroides cambia entre un 10 y un 20 por ciento al rotar, el de ‘Oumuamua variaba hasta diez veces, algo inusitado. Eso indicaba que el cuerpo poseía una singular forma de aguja, lo cual hacía que unas veces exhibiese una gran superficie brillante y otras un borde muy estrecho.

Por su tamaño y sus proporciones, era difícil obviar la semejanza del objeto con un gran cohete espacial (como el

1I/‘Oumuamua

El primer visitante interestelar descubierto en el sistema solar no cumple las expectativas de los científicos respecto a la naturaleza de tales intrusos espaciales. Sorprende su forma muy alargada y el hecho de que parezca estar sometido a alguna otra fuerza aparte de la gravedad, pese a no mostrar la típica liberación de gases de los cometas.

Neptuno
Urano
Saturno
Órbita de Júpiter
Velocidad de entrada 26,3 kilómetros por segundo (5,5 UA/año)
Heliopausa
Posición actual (octubre de 2020)
Mayo de 2038
Plano del sistema solar
Sol
18 de junio
18 de julio
Marte
18 de agosto
Venus
Mercurio
Sol
Tierra
18 de septiembre
1I/‘Oumuamua
Descubrimiento: 18 de octubre de 2017
18 de noviembre
Los planetas están situados como en la fecha del descubrimiento

TRAYECTORIA

‘Oumuamua se acercó al plano del sistema solar desde arriba, se hundió por debajo del Sol y volvió a emerger más allá de la órbita de la Tierra. Los científicos siguieron sus movimientos durante los cuatro meses en que fue visible, antes de alcanzar la órbita de Júpiter.

Alargado
Achatado
Fractal
Brillo
Tiempo
8 horas

DESCUBRIMIENTO

Robert Weryk lo identificó con el telescopio Pan-STARRS, un instrumento de 1,8 metros situado en la isla hawaiana de Maui.

APARIENCIA

Se desconocen sus dimensiones exactas, pero su forma muy alargada no se parece a la de ninguno de los miles de objetos observados hasta ahora en el sistema solar.

CURVA DE LUZ

Lo que sabemos sobre la forma de ‘Oumuamua se deduce de su curva de luz (la luz que refleja en función del tiempo). Los cambios drásticos indican que debe ser un objeto muy alargado, que unas veces muestra una cara reflectante pequeña y otras una gran superficie.



ORIGEN

Lo más probable es que se trate de un vestigio de la formación de un sistema planetario lejano, del cual habría sido expulsado hace mucho tiempo.

FUENTE: BASE DE DATOS DE CUERPOS MENORES, LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO/NASA (*trayectoria*); MATTHEW TWOMBLY (*ilustraciones*)

Saturno V, que medía unos 110 por 10 metros). De hecho, los astrónomos que inspeccionan el cielo en busca de asteroides y cometas en ocasiones redescubren cohetes desechados que orbitan alrededor del Sol, como ocurrió con 2000 SG344, un posible vestigio del programa Apolo avistado en el año 2000. Pero la órbita de ʻOumuamua era demasiado extrema para ser un cohete de los años sesenta. ¿Podía tratarse de un cohete lanzado por otra civilización? Por increíble que parezca, inicialmente los científicos no fueron capaces de descartar esa posibilidad a partir de los datos disponibles.

¿ARTEFACTO ALIENÍGENA O PELUSA CÓSMICA?

Mientras los astrónomos meditaban sobre esa cuestión, se llevaron una nueva sorpresa. En junio de 2018, el astrónomo Marco Micheli, de la Agencia Espacial Europea, y sus colaboradores publicaron unas mediciones de la forma de la órbita de ʻOumuamua. Y estas revelaban la acción de una débil fuerza, similar a la de un cohete, que propulsaba el cuerpo junto a las fuerzas gravitatorias ejercidas por el Sol y los planetas.

Se sabe que los cometas están sometidos a fuerzas no gravitatorias, generadas por el empuje asimétrico de los hielos que se subliman en el lado diurno de sus núcleos. Pero ʻOumuamua no es un cometa y tampoco mostraba ningún indicio de estar perdiendo masa, lo cual podría haber explicado esa fuerza. ¿Podría ser que ʻOumuamua emitiera solo gas, el cual es más difícil de detectar que el polvo de un cometa? Quizás, pero eso lo convertiría en un objeto único: los astrónomos no conocen ningún otro cuerpo cósmico que libere gases sin desprender polvo o hielo. Micheli propuso que tal vez ʻOumuamua arrojara partículas de polvo muy grandes que resultasen invisibles para nuestros telescopios.

En noviembre de 2018, Shmuel Bialy y Avi Loeb, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, postularon que la fuerza no gravitatoria podía deberse a la luz solar, que ejerce una pequeña presión sobre cualquier objeto que encuentra en su camino. Sin embargo, para que ʻOumuamua experimentara una presión de radiación detectable, el objeto tendría que ser tremendamente delgado, como una hoja de poliéster BoPET (el plástico aluminizado que se emplea para fabricar globos de cumpleaños), o presentar una densidad muy baja. Bialy y Loeb plantearon la posibilidad de que el objeto fuera una «vela solar» desprendida de algún vehículo construido por otra civilización, un sistema de propulsión diseñado para aprovechar el empuje de la luz de las estrellas.

Por atractiva que pueda resultar esa idea, la mayoría de los astrónomos piensan que el origen de ʻOumuamua es natural. En febrero de 2019, uno de nosotros (Moro Martín) calculó que la densidad del objeto tendría que ser 100 veces menor que la del aire para que la luz solar pudiera propulsarlo. Tal «pelusa» de polvo cósmico —lo que se conoce como un agregado fractal helado— podría haberse originado en las regiones externas del disco protoplanetario de otra estrella, donde se forman planetas incipientes a partir de restos de hielo y polvo. El pasado verano, Luu, Eirik Flekkøy y Renaud Toussaint, los tres de la Universidad de Oslo, propusieron que ʻOumuamua había surgido a partir de una acumulación de partículas de polvo en la coma de un cometa activo, del que luego habría escapado. Aunque ese tipo de material es desconocido en la Tierra, se piensa que podría subsistir en el vacío del espacio interestelar.

Vistas las peculiaridades de ʻOumuamua, lo más increíble de todo es que ese tipo de objetos deben de ser muy comunes. Sabemos que si logramos detectar ese cuerpo relativamente pequeño fue porque pasó cerca de la Tierra, y que no hemos tenido la capacidad de ver objetos así hasta hace unos años (Pan-STARRS empezó a operar en 2010, pero no alcanzó su máxima eficiencia hasta hace poco). Un análisis puramente estadístico de estos dos hechos arroja que hay aproximadamente uno de esos intrusos interestelares por cada 10 UA cúbicas de espacio (una UA, o unidad astronómica, es la distancia entre la Tierra y el Sol). Por lo tanto, en la región planetaria de nuestro sistema solar, definida como una esfera con el radio de la órbita de Neptuno, habría unos 10.000 objetos similares. ʻOumuamua solo es el primero que se ha acercado lo bastante como para detectarlo desde que Pan-STARRS entró en funcionamiento. Si esos cuerpos tardan cerca de una década en atravesar la región planetaria, en promedio ¡deberían llegar unos tres intrusos al día!

Por su tamaño y sus proporciones, era difícil obviar la semejanza de ʻOumuamua con un gran cohete espacial. ¿Podía tratarse de un cohete lanzado por otra civilización?

¿Qué nos dice esa frecuencia sobre el origen de ʻOumuamua? Los extraterrestres podrían ser capaces de enviar cohetes del tamaño del Saturno V o enormes fragmentos de materiales similares al BoPET a través de la galaxia y de nuestro sistema solar, pero ¿por qué mandarían tantos? Aún más increíble, si extrapolamos nuestro análisis del sistema solar a toda la Vía Láctea, esta debería albergar entre 10^{24} y 10^{25} (entre uno y diez cuatrillones) objetos similares. Cuesta creer que una civilización extraterrestre pudiera inundar la galaxia con tanta basura espacial, y todavía es más difícil imaginar por qué querría hacerlo. Teniendo en cuenta la máxima de que las afirmaciones extraordinarias requieren pruebas extraordinarias, la mayoría de los astrónomos consideran que ʻOumuamua no es más que un resto natural con forma extraña, procedente de algún lugar de nuestra galaxia.

UN SEGUNDO DESCUBRIMIENTO

Dada la singularidad de ʻOumuamua, los astrónomos aguardaban con impaciencia el descubrimiento de un segundo intruso interestelar. ¿Sería igual de peculiar? ¿O se asemejaría a un cometa ordinario del sistema solar o a un asteroide sin movimiento no gravitatorio?

Sin conocer la respuesta a esas preguntas, pronosticamos que el segundo objeto llegaría en uno o dos años, a partir del cálculo que apuntaba a la existencia de un cuerpo similar a ʻOumuamua por cada 10 UA cúbicas. Para nuestro deleite, dos años después del hallazgo de ʻOumuamua, el astrónomo aficionado ucraniano Gennadiy Borisov descubrió C/2019 Q4 con un telescopio casero; su hallazgo pronto sería rebautizado como 2I/Borisov, el segundo objeto interestelar.

Aunque presenta una órbita aún más extrema que la de ʻOumuamua, parece tratarse de un cometa bastante común. Las observaciones del telescopio espacial Hubble revelaron que su

2I/Borisov

El segundo intruso interestelar conocido contrasta con el primero en muchos aspectos. Se parece a un cometa ordinario, con su forma redondeada y su ausencia de movimientos inesperados. Borisov se ajusta a las predicciones de los astrónomos para los objetos procedentes de fuera del sistema solar, y probablemente se trate de material planetario sobrante, expulsado de la periferia helada de un sistema planetario incipiente.

Neptuno

Urano

Velocidad de entrada 32,2 kilómetros por segundo (6,8 UA/año)

Saturno

2I/Borisov
Descubrimiento:
30 de agosto de 2019

Heliopausa

Plano del sistema solar

Sol

Órbita de Júpiter

Posición actual (octubre de 2020)

Marzo de 2037

TRAYECTORIA

A Borisov lo detectamos antes, mientras se internaba en el sistema solar. Se acercó al plano de nuestro sistema desde arriba y lo cruzó más allá de la órbita de Marte, y aún podemos verlo con nuestros telescopios.

30 de septiembre

30 de octubre

Marte

30 de noviembre

Venus

Mercurio

Sol

30 de diciembre

Tierra

Los planetas están situados como en la fecha del descubrimiento

30 de enero de 2020

29 de febrero

800–1000 metros

'Oumuamua (como referencia)

Línea de nieve

DESCUBRIMIENTO

Lo halló Gennadiy Borisov, astrónomo aficionado de Ucrania, con su telescopio casero de 0,65 metros.

ASPECTO

Se desconoce su forma real, pero podría parecerse a un cometa ordinario de entre 400 y 500 metros de radio. Muestra la típica cola de un cometa.

DESGASIFICACIÓN

Como la mayoría de los cometas, Borisov libera gases a medida que se sublima el hielo de su superficie. Eso le confiere un impulso adicional.

ORIGEN

Dado que contiene hielo, se piensa que Borisov fue expulsado de la fría periferia de un sistema planetario lejano.

FUENTE: BASE DE DATOS DE CUERPOS MENORES, LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO/NASA (*trayectoria*); MATTHEW TWOMBLY (*ilustraciones*)

núcleo es más grande que ‘Oumuamua, con un radio de entre 0,2 y 0,5 kilómetros. A diferencia del primer intruso, su curva de luz no presenta variaciones drásticas y su movimiento no gravitatorio se debe a la desgasificación asimétrica que tiene lugar a medida que el hielo se desprende de su superficie, igual que en los cometas del sistema solar. El pasado marzo, su brillo se intensificó brevemente y pareció duplicarse, al separarse un pequeño fragmento del núcleo, un fenómeno habitual en los cometas de nuestro sistema. En otras palabras, este cuerpo se ajusta a la perfección a lo que habríamos esperado de un objeto interestelar.

Nuestras expectativas se basan en las teorías de formación planetaria, que sugieren la existencia de un mecanismo capaz de expulsar objetos de sus sistemas planetarios. Una vez libres en la galaxia, esos cuerpos pueden acabar llegando a nuestro pequeño rincón del cosmos. Los estudios apuntan a que el proceso de formación planetaria comienza de forma ordenada, pero termina sumido en el caos [*véase* «Nacido del caos», por Konstantin Batygin, Gregory P. Laughlin y Alessandro Morbidelli; Investigación y Ciencia, julio de 2016]. El Sol, por ejemplo, nació hace 4600 millones de años en un disco giratorio aplanado, generado a medida que una gigantesca nube molecular se contraía por efecto de su propia gravedad. El disco de gas, hielo y polvo que alimentaba a la incipiente estrella central era muy denso, de modo que los diminutos granos chocaban entre sí y se adherían unos a otros. Al principio se formaron objetos del tamaño de un guijarro, después cuerpos más grandes conocidos como planetesimales y por último los planetas. Poco después de su formación, algunos planetesimales fueron dispersados a las regiones externas del sistema solar, con lo que dejaron de crecer y de calentarse. Desde entonces han permanecido allí, congelados y prácticamente inalterados.

En ocasiones, sin embargo, esos cuerpos regresan al interior del sistema, donde el calor del Sol sublima sus hielos; el material liberado genera una cola, y entonces los llamamos cometas. Otros planetesimales son expulsados por completo del sistema, condenados a vagar para siempre entre las estrellas. Una vez perdidos en la inmensidad de la Vía Láctea, tales objetos tienen una probabilidad ínfima de reincorporarse al sistema planetario del que proceden, pero pueden desviarse debido a la atracción gravitatoria de otros astros. Dado lo caótico del proceso y los numerosos encuentros que ‘Oumuamua y Borisov han debido experimentar antes de llegar aquí, lo más probable es que nunca podamos precisar cuánto llevan vagando por el espacio o de dónde proceden.

Con todo, podemos afirmar con confianza que Borisov es un planetesimal rico en hielo procedente de las regiones externas del disco protoplanetario de alguna estrella. De hecho, todo lo que sabemos sobre Borisov (que constituye una prueba de que algunos objetos interestelares presentan el aspecto que esperábamos) no hace sino subrayar la singularidad de ‘Oumuamua. Dadas las enormes diferencias entre ambos objetos, no hay razones para suponer que su origen es el mismo.

Los astrónomos siguen tratando de desentrañar la naturaleza de ‘Oumuamua, y no dejan de aparecer nuevas teorías. Una de ellas, enunciada el pasado mayo por Darryl Seligman, de la Universidad de Chicago, y Gregory Laughlin, de la Universidad Yale, sostiene que ‘Oumuamua es un nuevo tipo de cuerpo compuesto por hielo de hidrógeno molecular: un iceberg cósmico originado en las regiones más frías de una nube molecular. Sin embargo, Loeb y Thiem Hoang, del Instituto de Astronomía y Ciencias Espaciales de Corea, adujeron el pasado junio que la elevada volatilidad del hidrógeno molecular impediría que un cuerpo así se formara en una nube molecular o sobreviviera a una travesía interestelar.

Otra opción, que propusieron en abril Yun Zhang, de los Observatorios Astronómicos Nacionales de la Academia China de las Ciencias, y Douglas N. C. Lin, de la Universidad de California en Santa Cruz, es que ‘Oumuamua sea una esquirla generada por la destrucción gravitatoria de un planeta u otro cuerpo que pasó demasiado cerca de su estrella anfitriona.

Dejando a un lado las extrañas propiedades de ‘Oumuamua, su mero hallazgo contradice nuestras ideas habituales sobre la formación de sistemas planetarios, según las cuales deberíamos tener muy pocos visitantes de fuera del sistema solar. Podemos estimar el número de planetesimales interestelares que esperamos que existan por unidad de volumen del espacio a partir de la cantidad de estrellas observadas y de nuestros conocimientos sobre la formación estelar y planetaria, así como sobre la dinámica y la evolución de las estrellas. Los cálculos presentan muchas incertidumbres, pero un límite superior generoso estaría entre una décima y una centésima parte de la frecuencia estadística que hemos mencionado antes (10.000 objetos interestelares en la región planetaria). En otras palabras, no sabemos cómo puede haber tantos escombros en la galaxia. A medida que detectemos más intrusos interestelares y comprendamos mejor su naturaleza, quizás la densidad espacial inferida y la estimada comiencen a converger. Pero también podríamos estar pasando por alto alguna fuente importante de objetos interestelares, otro proceso astrofísico (distinto de la dispersión de planetesimales que hemos descrito) que produzca cuerpos capaces de llegar hasta nosotros.

Lo más probable es que nunca podamos precisar cuánto llevan vagando por el espacio o de dónde proceden ‘Oumuamua y Borisov

BOTES SALVAVIDAS CÓSMICOS

Aparte de darnos pistas sobre la formación de los sistemas planetarios, el descubrimiento de visitantes interestelares podría ser relevante para uno de los mayores misterios de la ciencia: ¿cómo empezó la vida en la Tierra? La idea de la panspermia propone que las semillas de los antiguos organismos llegaron en asteroides procedentes de otros sistemas [*véase* «¿Vino de otro mundo la vida?», por David Warmflash y Benjamin Weiss; Investigación y Ciencia, enero de 2006].

Igual que esperamos que los cuerpos interestelares atraviesen de vez en cuando el sistema solar, también debemos suponer que en ocasiones chocan contra nuestro planeta. Considerando la cifra de un objeto por cada 10 UA cúbicas inferida a partir de la detección de ‘Oumuamua y Borisov, podemos estimar que este tipo de objetos impactan cada cien o doscientos millones de años, es decir, con una frecuencia miles de veces menor que los asteroides de tamaño similar. Es probable que la mayoría de ellos estallaran y se dispersaran en la atmósfera, pero unos pocos alcanzarían la superficie. Los científicos calculan que, a lo largo de

los eones, deben haberse estrellado contra la Tierra varios miles de millones de toneladas de material interestelar.

¿Podría ser que esas colisiones trajeran la vida a nuestro planeta? La idea científica moderna de la panspermia data del siglo XIX. Curiosamente, los asteroides y cometas podrían proteger de forma eficaz la frágil vida celular. Los nocivos rayos cósmicos, capaces de romper el ADN, solo penetran unos metros en los materiales sólidos, así que las células vivas enterradas en las rocas podrían sobrevivir a travesías interestelares de millones o incluso cientos de millones de años. Cualquier célula sometida a temperaturas interestelares próximas al cero absoluto se encontraría en un estado de animación suspendida. Además, tendría que soportar el impacto contra el planeta, aunque tal vez eso no sea tan difícil como parece: algunos experimentos ya han demostrado que las bacterias terrestres pueden sobrevivir a choques producidos a velocidades cósmicas. Si bien no hay pruebas de que la vida se propague por la galaxia en el interior de asteroides y cometas, en vista de nuestro desconocimiento actual, es una posibilidad que no podemos descartar.

TELESCOPIOS Y SOBREVUELOS

Si queremos entender mejor los objetos interestelares, necesitamos más ejemplos: con tan solo dos, nuestra comprensión aún es muy limitada. Por suerte, los últimos avances en astronomía auguran que pronto detectaremos decenas de cuerpos similares, lo que nos permitirá determinar sus propiedades físicas y elaborar estadísticas más precisas. La mayoría de los telescopios profesionales tienen campos de visión muy pequeños, que a menudo equivalen a algunas milésimas del área de la luna llena. Pero los sistemas ópticos y grandes detectores actuales son capaces de captar un área mayor que la de la luna en una sola fotografía, así como de obtener una imagen completa del cielo en una o dos noches de observación continua. Y los potentes ordenadores permiten comparar exploraciones sucesivas de todo el cielo para hallar objetos en movimiento, incluidos los intrusos interestelares.

Disponer de una muestra más amplia de objetos interestelares nos ayudaría a responder muchas preguntas sobre ellos. ¿Cuántos intrusos son alargados y carecen de hielo, como ‘Oumuamua, y cuántos se asemejan a cometas, como Borisov? ¿Los hay más grandes? ¿Y más pequeños? ¿De qué están hechos? ¿Realmente pueden ser tan porosos como para que los impulse la presión de la luz? Los futuros datos del observatorio Rubin, que se está construyendo en la cima de una montaña chilena, deberían aportar nuevas pistas. El telescopio Rubin posee un espejo colector de 8,4 metros de diámetro y un sensor de 3000 millones de píxeles que habría sido impensable hace apenas una década. Cada imagen captada por esa gigantesca cámara abarcará un área 40 veces mayor que la de la luna, lo que supone un tremendo avance. El instrumento explorará el cielo de manera repetida y sistemática, y más a fondo que nunca. Se espera que descubra numerosos intrusos interestelares, así como una ingente cantidad de objetos del cinturón de Kuiper, asteroides y cometas de nuestro sistema solar.

A fin de entender plenamente la naturaleza de cualquier intruso interestelar, lo ideal sería enviar una nave espacial para sobrevolarlo o incluso aterrizar en él. Una dificultad práctica es que no disponemos de mucho tiempo para hacer planes, dado lo rápido que se mueven esos objetos. A los pocos meses de su descubrimiento, ‘Oumuamua se desvaneció hasta para los telescopios más grandes, y en uno o dos años 2I/Borisov será demasiado tenue para detectarlo. En cambio, el diseño, aprobación, construcción y lanzamiento de una misión espacial suele requerir al menos un decenio, así que no es posible fijar un objetivo interestelar concreto. Una solución sería enviar la nave a una órbita de almacenamiento antes incluso de saber cuál será su destino. Ese es el espíritu del Interceptor de Cometas, una misión de la Agencia Espacial Europea cuyo lanzamiento está previsto en 2028. La nave se estacionará en el punto de Lagrange L2, a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra, donde puede mantener una órbita estable mientras espera a que descubramos algún objeto interesante que sobrevolar. No obstante, el Interceptor no tendrá la potencia necesaria para acudir al encuentro de ningún intruso a no ser que, por casualidad, pase muy cerca de L2.

Los cohetes más avanzados son pesados y caros de lanzar. Aunque fuera posible realizar un sobrevuelo, lograr que aceleren hasta la velocidad de la órbita hiperbólica y tomen una muestra no será tarea fácil. Las naves espaciales que emplean métodos novedosos de propulsión, como velas solares aceleradas por rayos láser emitidos desde la Tierra o por la presión de la radiación solar, constituyen otra opción, pero adolecen de sus propias dificultades [*véase* «Misión a Alfa Centauri», por Ann Finkbeiner; Investigación y Ciencia, mayo de 2017]. Aun así, la perspectiva de poder examinar de cerca objetos originados más allá de nuestro sistema solar es extraordinaria, y los científicos se han lanzado a proponer diversas maneras de conseguirlo. De un modo u otro, acabaremos desvelando los secretos de nuestros visitantes interestelares.

PARA SABER MÁS

The natural history of ‘Oumuamua. Michele T. Bannister et al. en *Nature Astronomy*, vol. 3, págs. 594-602, julio de 2019.
Initial characterization of interstellar comet 2I/Borisov. Piotr Guzik et al. en *Nature Astronomy*, vol. 4, págs. 53-57, enero de 2020.
Outburst and splitting of interstellar comet 2I/Borisov. David Jewitt et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 896, art. L39, junio de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El sistema solar más allá de Neptuno. Michael D. Lemonick en *IyC*, enero de 2015.
Cita con el objeto interestelar 1I/2017 U1 (‘Oumuamua). Josep Maria Trigo Rodríguez en el blog *Meteoritos y ciencias planetarias*, 21 de noviembre de 2017.
La visita del primer cometa interestelar: 2I/ Borisov. Josep Maria Trigo Rodríguez en el blog *Meteoritos y ciencias planetarias*, 6 de noviembre de 2019.
El origen de ‘Oumuamua. Lara Hartung en www.investigacionyciencia.es, 22 de abril de 2020.
Al final, también el segundo visitante interestelar guardaba una sorpresa. Robert Gast en www.investigacionyciencia.es, 29 de abril de 2020.



EVOLUCIÓN

El PROBLEMA *con* NUESTRA DENTADURA

Los dientes humanos están apiñados, torcidos y plagados de caries. No ha sido siempre así

Peter S. Ungar

La escena que presencié mientras aguardaba a mi hija en la sala de espera del dentista me recordó a una cadena de montaje. Los pacientes entraban, uno tras otro, resignados a perder sus terceros molares. Todos salían con un vendaje alrededor de la cabeza, perfectamente ajustado, que sujetaba una bolsa con hielo e invariablemente llevaban consigo una camiseta de regalo, un folleto con instrucciones para el cuidado en casa y recetas para antibióticos y analgésicos.

Hoy en día la extracción de las muelas del juicio es casi un rito iniciático a la edad adulta en Estados Unidos. Pero, desde mi punto de vista, esta suerte de tradición no tiene mucho sentido. Como biólogo evolutivo y antropólogo dental, he estudiado durante 30 años las dentaduras del ser humano y sus antepasados, amén de las de innumerables animales. Nuestros problemas dentales no son normales. La mayoría de los vertebrados no los padece: rara vez presentan dientes torcidos o cariados. En los fósiles de nuestros antepasados no encontramos muelas del juicio retenidas y los indicios de periodontitis son excepcionales.

De hecho, la dentadura del ser humano moderno es una profunda contradicción. Es la parte más dura del cuerpo y, a la vez, es increíblemente frágil. En el registro fósil, los dientes se conservan por espacio de millones de años, pero parece que los nuestros no son capaces de durar una vida. Gracias a ellos, nuestros antepasados dominaron el mundo viviente, pero en cambio nosotros hemos de cuidarlos a diario para mantenerlos en buen estado. Esta contradicción es nueva, afecta a las poblaciones contemporáneas y se remonta, básicamente, a la época industrial.

ADAM VOORHES, GALLERY STOCK

EN SÍNTESIS

Los problemas dentales como el apiñamiento y la caries son muy comunes en la especie humana. En cambio, no lo son en otros mamíferos ni lo fueron en nuestros antepasados fósiles.

La dentadura evolucionó durante millones de años para ser increíblemente dura y estar alineada con precisión para masticar con eficiencia. Todo eso funciona bajo ciertas condiciones bucales.

Nuestras afecciones dentales obedecen ante todo al cambio en el entorno bucal motivado por el consumo de alimentos más blandos y azucarados que los que ingerían nuestros ancestros.

La razón es la discordancia entre la alimentación actual y aquella para la que están preparadas nuestra dentición y nuestras mandíbulas. Los paleontólogos hace tiempo que saben que la dentadura está profundamente arraigada en la historia evolutiva. Y ahora, los investigadores clínicos y los odontólogos comienzan a ser conscientes de ello.

Peter S. Ungar es paleontólogo y antropólogo dental en la Universidad de Arkansas. Investiga las adaptaciones a la alimentación en los primates vivos y extintos.



ORÍGENES REMOTOS

Los biólogos evolutivos se maravillan ante el ojo humano, que califican como un «diseño prodigioso». A mi parecer, el diente no tiene nada que envidiarle. Tritura millones de veces a lo largo de la vida sin romperse y lo hace pese a estar fabricado con los mismos componentes de que están hechos los alimentos. Los ingenieros tienen mucho que aprender de él. Esa resistencia extraordinaria deriva de su ingeniosa estructura, que le confiere la dureza y la fortaleza necesarias para impedir la aparición y la extensión de las grietas. Ambas virtudes son el fruto de la combinación de dos componentes: una capa externa de esmalte, compuesta casi por entero de fosfato cálcico, que recubre una capa interna de dentina, provista de fibras orgánicas que la dotan de flexibilidad.

Ahora bien, la verdadera magia ocurre a escala microscópica. Piense en un espagueti seco que se quiebra si se dobla. Imagínese miles de ellos juntos. El esmalte está formado por cristales que son como esos espaguetis, cada uno con el grosor de una milésima parte de un cabello, que, agrupados, conforman unas varillas, llamadas prismas. A su vez, estos forman haces, decenas de miles por milímetro cuadrado, que constituyen la cubierta de esmalte. Los haces están dispuestos en paralelo, desde la superficie del diente hasta la dentina subyacente, pero se retuercen y entrelazan sinuosamente durante todo el trayecto, lo que les dota de una durabilidad asombrosa.

Este diseño no surgió de la noche a la mañana. La naturaleza ha estado experimentando con los dientes durante cientos de millones de años. Hallazgos recientes en los campos de la paleontología, la genética y la biología del desarrollo han permitido reconstruir la evolución de su estructura.

Los primeros vertebrados fueron los peces sin mandíbula, o agnatos, surgidos hace más de 500 millones de años, durante el Cámbrico. Pese a carecer de dientes, muchos de sus descendientes poseían una cola escamosa y un escudo cefálico a modo de armadura, formado por placas de fosfato cálcico parecidas a las de los dientes. Cada placa estaba compuesta por una superficie externa de dentina, a veces cubierta por otra capa más dura y más mineralizada, y por una cavidad pulpar interior que albergaba vasos sanguíneos y nervios. La boca de algunos estaba rodeada de placas con pequeñas protuberancias o barbas que facilitaban la alimentación. La mayoría de los paleontólogos cree que esas escamas fueron las que finalmente aprovechó la evolución para crear los dientes. De hecho, las escamas de los tiburones actuales son tan parecidas a ellos que las agrupamos en una categoría de estructuras llamadas odontodos. Los biólogos del desarrollo han demostrado que tanto las escamas de los escualos como los dientes nacen de la misma forma a partir de tejido embrionario, y pruebas moleculares recientes confirman que su control radica en los mismos genes.

Los primeros dientes surgirían más tarde, con los peces mandibulados. Eran básicamente simples protuberancias puntiagudas con que capturar e inmovilizar las presas y raspar, arrancar, sujetar y morder toda clase de seres vivos. Hace 430 millones de años, durante el Silúrico, algunos acantodios (peces espinosos extintos, emparentados con los tiburones primitivos) ya tenían dientes. Carecían de una capa hipermineralizada que cubriese las coronas de dentina, y ni los perdían ni los reemplazaban, pero aun así, eran dientes. Algunos poseían escamas en los labios y las mejillas que se podrían catalogar como dientes si estaban cerca de la boca, una prueba irrefutable del vínculo existente entre ambos elementos anatómicos. Incluso en esa forma rudimentaria, la posesión de dientes debió otorgar una ventaja clara, pues se propagó con rapidez a lo largo y ancho de los mares primitivos y los linajes dentados acabaron imponiéndose a los desdentados.

Una vez colocados en su lugar, se sucedieron numerosas innovaciones: cambios en la forma, la cantidad y la disposición, así como en el reemplazo y la fijación a la mandíbula. El esmalte apareció hace unos 415 millones de años, a caballo entre el Silúrico y el Devónico, en el grupo de los sarcopterigios. Este engloba a los tetrápodos actuales (anfibios, reptiles y mamíferos) y los peces de aletas lobuladas, conocidos por sus aletas pareadas delanteras y traseras, provistas de huesos y músculos similares a los de las extremidades terrestres. Otros peces no poseen ni el esmalte ni los genes que codifican las proteínas para su fabricación. Al inicio, el esmalte quedó limitado a las escamas, de lo que se infiere que, a semejanza de los dientes, tuvo su origen en la piel y más tarde dio el salto a la boca.

La dentición ha tenido una gran importancia en el origen y la evolución inicial de los mamíferos, debido a su papel en la adquisición de la endotermia (sangre caliente). Ser capaz de generar tu propio calor corporal te brinda un montón de ventajas, como la posibilidad de colonizar los lugares fríos y con oscilaciones térmicas acusadas, mantener velocidades de marcha rápidas con que abarcar territorios más extensos y mayor vigor para buscar alimento, huir de los enemigos y cuidar las crías. Pero la endotermia tiene un coste: un mamífero en reposo quema 10 veces más energía que un reptil de talla similar. La presión selectiva para alimentar la caldera corporal ha recaído en los dientes. Otros vertebrados capturan, sujetan y matan a sus presas con ellos. La dentadura de los mamíferos debe extraer más calorías de cada bocado. Y para ello, hay que masticar.

Los dientes de los mamíferos guían los movimientos de masticación, dirigen y disipan las fuerzas masticatorias y sujetan, desgarran, trocean y trituran. Para el correcto funcionamiento del proceso, las superficies encaradas deben quedar separadas por una fracción de milímetro. Tal precisión explica por qué, a diferencia de los peces y los reptiles, la mayoría de los mamíferos no los renuevan cuando se desgastan o se rompen. Los mamíferos arcaicos ya renunciaron a esa facultad en favor de la masticación.

Los prismas de esmalte forman parte del mismo paquete adaptativo. La mayoría de los entendidos cree que aumentan la dureza de los dientes hasta el grado necesario para conseguir una masticación adecuada. No está claro si evolucionaron una sola vez o varias de forma independiente, pero, en cualquier caso, la estructura dental básica de los mamíferos (una corona de dentina recubierta por esmalte prismático) ya estaba en el lugar adecuado en el Triásico. Las innumerables formas de los molares de los mamíferos, incluidos los nuestros, son simples variantes del mismo plan general.

PARTES DEL DIENTE



AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

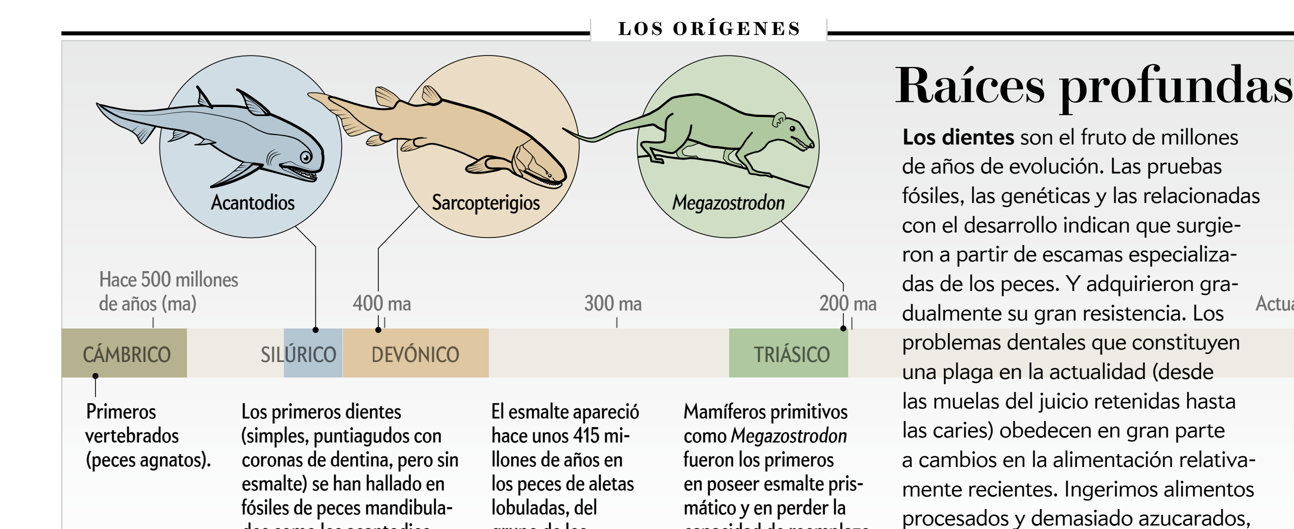
DESEQUILIBRIO MICROBIANO

La historia evolutiva de nuestra dentadura no solo explica su gran dureza, sino los problemas que la acucian en la actualidad. La idea básica es que toda estructura evoluciona para operar dentro de un margen de condiciones ambientales que, en el caso de la dentadura, engloba los compuestos químicos y las bacterias que colonizan la boca, además de la presión y la abrasión. De ello se deduce que los cambios en el entorno bucal pueden pillar a los dientes con la guardia baja. Sucede así con nuestra alimentación actual, distinta a todas las habidas en la historia de la vida. El desajuste entre nuestra biología y nuestro comportamiento explica las caries, las retenciones de los terceros molares y otros problemas de ortodoncia que nos afectan.

La caries es la afección crónica más común y extendida en el planeta. Afecta a más de nueve de cada diez estadounidenses (y españoles) y a miles de millones de personas en todo el mundo. En cambio, durante los últimos 30 años he estudiado cientos de miles de piezas dentales de animales vivos y extintos y rara vez he visto alguna cariada.

Para entender por qué la dentadura del hombre moderno es tan propensa a sufrir caries, es preciso tener en cuenta el entorno bucal natural. La boca sana está repleta de vida, con millones de microbios de hasta 700 especies de bacterias, para comenzar. La mayoría de esas bacterias son beneficiosas: combaten enfermedades, facilitan la digestión y regulan diversas funciones corporales. Otras, las menos, son perjudiciales, como los estreptococos mutantes y *Lactobacillus*: el ácido láctico que generan con su metabolismo ataca el esmalte dental. Por suerte, suelen ser demasiado escasas como para causar daños permanentes, pues su proliferación se mantiene bajo control gracias a sus primas comensales, las integrantes del grupo de *Streptococcus mitis* y *S. sanguinis*. Estas producen sustancias alcalinas (que suben el *p*H), además de proteínas antimicrobianas que inhiben el crecimiento de las especies dañinas. La saliva protege los dientes frente al ataque del ácido y los baña en calcio y fosfato para remineralizar su superficie. El equilibrio entre la desmineralización y la remineralización se ha mantenido durante cientos de millones de años, por lo que el microbioma bucal de los

LOS ORÍGENES



Raíces profundas

Los dientes son el fruto de millones de años de evolución. Las pruebas fósiles, las genéticas y las relacionadas con el desarrollo indican que surgieron a partir de escamas especializadas de los peces. Y adquirieron gradualmente su gran resistencia. Los problemas dentales que constituyen una plaga en la actualidad (desde las muelas del juicio retenidas hasta las caries) obedecen en gran parte a cambios en la alimentación relativamente recientes. Ingerimos alimentos procesados y demasiado azucarados, muy distintos a los que comían nuestros antepasados lejanos.

JEN CHRISTIANSEN

mamíferos alberga tanto bacterias beneficiosas como dañinas. Todo está dispuesto para mantener una comunidad microbiana estable o, tal como lo expresan Kevin Foster, de la Universidad de Oxford, y sus colegas, para «mantener el ecosistema a raya».

Las caries aparecen cuando ese control se pierde. La abundancia de carbohidratos en nuestra alimentación favorece la proliferación de las bacterias productoras de ácido, que reducen el *p*H bucal. Los estreptococos mutantes y otras especies nocivas prosperan en el entorno ácido que fomentan ellas mismas y empiezan a desbancar a las bacterias beneficiosas, rebajando aún más el *p*H. Esta espiral desemboca en una disbiosis, un desequilibrio que favorece la multiplicación de la minoría dañina en detrimento de la mayoría beneficiosa, que en condiciones normales predomina en el microbioma bucal. La saliva no puede remineralizar el esmalte con la rapidez suficiente para compensar la pérdida, de modo que el equilibrio entre el deterioro y la restauración se rompe. La sacarosa (el azúcar de mesa) resulta especialmente problemática. Las bacterias nocivas se sirven de ella para formar una placa gruesa y tenaz que las mantiene adheridas a los dientes y les permite almacenar energía entre las comidas, lo que prolonga el ataque ácido al esmalte.

Los bioarqueólogos hace tiempo que sospechan que la transición de la caza y la recolección a la agricultura que tuvo lugar hace 10.000 años durante el Neolítico está vinculada con la caries, porque las bacterias productoras de ácido consumen carbohidratos fermentables, que abundan en el trigo, el arroz y el maíz. Por ejemplo, en los estudios de restos dentales dirigidos por Clark Larsen, de la Universidad Estatal de Ohio, se calculó que, a raíz de la difusión del cultivo del maíz a lo largo de la costa de Georgia en época prehistórica, la incidencia de las caries se multiplicó al menos por seis. No obstante, el vínculo con la agricultura no es tan sencillo: la incidencia varía en los primeros agricultores, tanto en el tiempo como en el espacio, y la dentadura de algunos cazadores-recolectores, como la de aquellos que recolectaban miel en abundancia, está plagada de caries.

El gran aumento de las caries llegó con la Revolución Industrial y la generalización de la sacarosa y de los alimentos ultraprocesados. En los últimos años, los estudios genéticos de bacterias enterradas en el sarro de dientes antiguos demuestran la transición en las comunidades microbianas. Los alimentos procesados también son más blandos y están más refinados, factores que facilitan aún más la aparición de las caries: hay que masticar menos para cortar la película orgánica y no abundan los elementos abrasivos que desgasten los recovecos y las grietas de los dientes, donde se acumula la placa bacteriana.

Por desgracia, el esmalte no se regenera como la piel o el hueso, por el modo en que se forman las cubiertas dentales. Este inconveniente se remonta al mismo momento de su aparición, en los peces de aletas lobuladas. Las células encargadas de su fabricación, los ameloblastos, migran hacia la superficie del diente desde el interior de la cápsula dejando tras de sí rastros de esmalte, los prismas. Y una vez que la corona se completa, ya no es posible fabricar más esmalte porque los ameloblastos se desprenden y desaparecen. No ocurre así con la dentina. Los odontoblastos que la producen actúan al mismo tiempo que los ameloblastos, pero migran hacia el interior, donde acaban forrando la cavidad pulpar. Allí siguen produciendo la dentina toda la vida y reparan el tejido gastado o dañado. Las lesiones importantes requieren la aparición de células nuevas, que fabrican la dentina necesaria para encapsular la cavidad pulpar y proteger el diente.

Pero cuando la caries se extiende, esas defensas naturales quedan sobrepasadas, la pulpa se infecta y, a la larga, el diente queda destruido. Desde la perspectiva evolutiva, un par de siglos es un destello fugaz, un lapso claramente insuficiente para que la dentadura se adapte a los cambios en el entorno bucal provocados por la ingesta del azúcar de mesa y de los alimentos procesados.

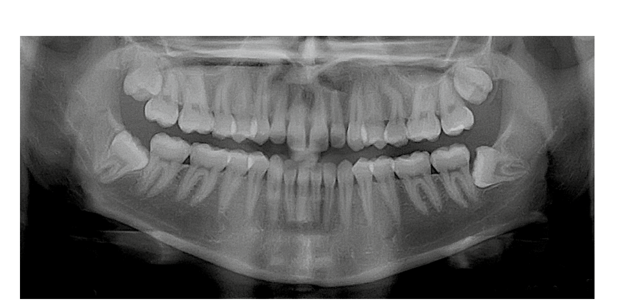
UN TRABAJO MENOS DURO

Las afecciones dentales han alcanzado cotas de epidemia. Nueve de cada diez personas tienen dientes que, al menos, están ligeramente desalineados o tienen un encaje deficiente, mientras que tres cuartas partes de la población carece del espacio suficiente para que las muelas del juicio salgan como es debido. En pocas palabras, nuestros dientes no encajan en nuestras mandíbulas. La causa fundamental es, como en el caso de las caries, el desequilibrio provocado por un entorno bucal con el que nunca tuvieron que lidiar los dientes de nuestros antepasados.

Durante la década de 1920, el famoso odontólogo australiano «Tick» Begg se dio cuenta del desajuste. Descubrió que los abo-

rígenes fieles a sus costumbres mostraban un mayor desgaste dental que los pacientes de origen europeo, pero, en cambio, sus arcos dentales eran perfectos: los dientes frontales estaban rectos y las muelas del juicio habían salido por completo y funcionaban a la perfección. Llegó a la conclusión de que la naturaleza espera que el deterioro entre los dientes adyacentes reduzca el espacio necesario en la boca. Creía que la longitud de la mandíbula estaba «programada de antemano» teniendo esto último en cuenta. Así que los dientes evolucionaron para masticar alimentos duros en un entorno abrasivo y nuestra alimentación blanda y limpia ha roto el equilibrio entre el tamaño de las piezas y la longitud de la mandíbula. De ahí la línea de montaje que contemplé en el dentista. Por desgaste o por extracción, la masa dental tiene que disminuir.

Con esta lógica en mente, Begg concibió el que es desde hace tiempo el procedimiento estrella para enderezar los dientes. Consiste en crear espacio extrayendo los premolares frontales, fijar luego un alambre a los «brackets» colocados en los dientes restantes y alinear el arco dental al tiempo que se van cerrando los huecos. Otros ya habían usado alambres para enderezarlos antes que Begg, pero no extraían los premolares y, como resultado, solían torcerse de nuevo. Al principio, muchos dentistas se oponían a la idea de empujar los dientes sanos para enderezar el arco, pero la técnica de Begg funcionaba, duraba toda la vida y la evolución respaldaba su teoría. Llegó a sugerir que los niños masticasen chicle con polvo abrasivo de carburo de silicio para desgastar la dentadura y prescindir así del tratamiento ortodóncico.



LAS MUELAS DEL JUICIO no pueden erupcionar bien cuando la mandíbula es demasiado corta, como ocurre en los niños que toman alimentos más fáciles de masticar que aquellos para los que nos ha preparado la evolución.

Begg estaba en lo cierto respecto al desajuste entre los dientes y las mandíbulas, pero se equivocaba en los detalles. Según el antropólogo Rob Corruccini, de la Universidad del Sur de Illinois, el cambio fundamental no fue el entorno abrasivo, sino el entorno de estrés, en alusión al estrés mecánico que sufren las mandíbulas cuando se mastica. Y no es que los dientes fueran demasiado grandes, sino que la mandíbula era demasiado pequeña.

Sorprende que Charles Darwin ya dedujera la conexión entre el estrés y el tamaño de la mandíbula en su libro *El origen del hombre*. Pero Corruccini fue uno de los primeros en aportar las pruebas definitivas. Acababa de empezar a dar clases en la Universidad del Sur de Illinois cuando un estudiante de un pueblo cercano le contó que los ancianos del lugar habían crecido comiendo alimentos duros, que costaba masticar, mientras que sus hijos y nietos disfrutaban de dietas más refinadas y procesadas. Un estudio ulterior demostró que los más viejos tenían mejores mordeduras, sin apenas haber visitado a un dentista, todo lo contrario que los jóvenes. En definitiva, las diferencias dentales no eran genéticas, sino ambientales. Corruccini emprendió la búsqueda de otros muchos ejemplos, como los pima de Arizona, antes y después de que tuvieran acceso a las tiendas de comestibles, o pueblos rurales de los alrededores de Chandigarh, en India, cuya dieta se basaba en mijo áspero y verduras duras, en contraste con la de los residentes urbanos, a base de pan blando y puré de lentejas.

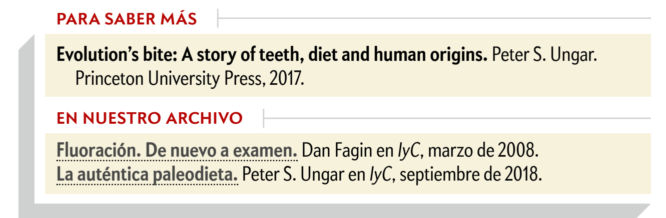
Dedujo así que el tamaño de los dientes está programado para encajar en una mandíbula en crecimiento que, durante la infancia, debe soportar los niveles de estrés mecánico propios de una alimentación natural. Si la mandíbula deja de recibir la estimulación precisa durante el desarrollo, los dientes delanteros se apiñan y los traseros tienen problemas para emerger. Confirmó la hipótesis con un experimento en monos: aquellos que comían dietas blandas tenían mandíbulas más pequeñas y dientes retenidos.

ODONTOLOGÍA DARWINIANA

Vistas desde una perspectiva darwiniana, queda claro que nuestras afecciones dentales son consecuencia de un cambio ecológico. Este nuevo punto de vista está ayudando a los investigadores y médicos a atacar sus causas. Los selladores protegen las coronas, y el flúor fortalece y remineraliza el esmalte, pero ninguno modifica las condiciones bucales que desatan las caries. Los enjuagues con antiséptico matan las bacterias cariógenas, pero también las cepas beneficiosas que las mantienen a raya. Inspirados en los avances en el campo de los tratamientos modificadores del microbioma, los investigadores están empezando a centrarse en la remodelación de la comunidad de la placa dental. Los probióticos bucales, los antimicrobianos específicos y los trasplantes de microbiota se vislumbran en el horizonte.

También hemos de tener presente el entorno bucal cuando reflexionamos sobre el tratamiento de las afecciones dentales. Los dentistas y los ortodoncistas se están dando cuenta de que los alimentos ultraprocesados y reblandecidos alteran las fuerzas que ejercen la cara y las mandíbulas. El esfuerzo masticatorio estimula el crecimiento normal de la mandíbula y de la parte central del rostro del niño. Comer esa clase de alimentos deja estas partes subdesarrolladas de forma crónica. Esto tiene implicaciones que van más allá del apiñamiento dental: se ha planteado que la restricción resultante de la vía respiratoria sería la culpable de la apnea del sueño, durante la cual la respiración se detiene y se reanuda repetidas veces.

Nadie quiere que los bebés se atraganten al comer, pero quizás existan mejores opciones para el destete que los purés. Últimamente ha surgido un enfoque nuevo que persigue el crecimiento de las mandíbulas con el fin de abrir las vías respiratorias y de que los dientes vuelvan a encajar como antaño. Los tratamientos van desde los expansores palatinos de quita y pon y otros dispositivos para guiar el crecimiento, hasta la cirugía. Pero si damos a nuestros hijos alimentos que exijan una masticación vigorosa desde pequeños, como nuestros antepasados, tal vez podamos ahorrarles a la mayoría alguna de esas intervenciones.



PARA SABER MÁS

Evolution's bite: A story of teeth, diet and human origins. Peter S. Ungar. Princeton University Press, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Fluoración. De nuevo a examen. Dan Fagin en *IyC*, marzo de 2008.
La auténtica paleodieta. Peter S. Ungar en *IyC*, septiembre de 2018.


JABÓN
JABÓN
TEST
TEST
JABÓN



VIROLOGÍA

DEL SIDA A LA COVID-19

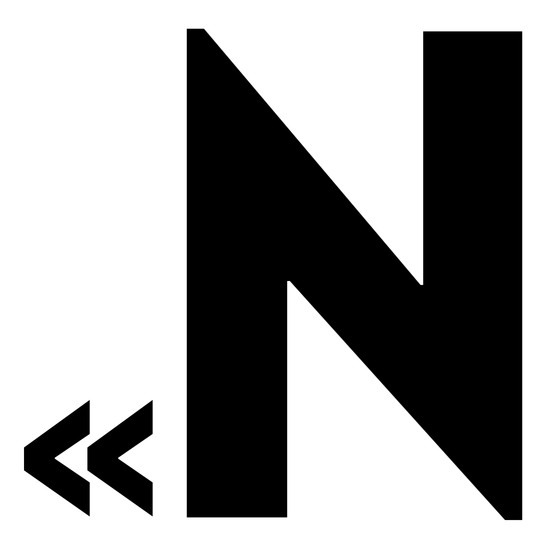
Los conocimientos adquiridos en los últimos decenios sobre el VIH pueden servirnos para combatir la pandemia actual

William A. Haseltine

Ilustración de Sol Cotti

William A. Haseltine ha sido profesor en la Escuela de Medicina de Harvard y fundador de los departamentos de investigación de cáncer y VIH-sida de dicha universidad. También es presidente del centro de estudios sobre salud mundial ACCESS Health International y ha fundado más de una docena de empresas de biotecnología.





«NOS HALLAMOS INMERSOS EN OTRO MORTÍFERO EPISODIO DE NUESTRA eterna lucha contra los microbios. Estas batallas han moldeado el devenir de la evolución humana y de la historia. Hemos visto la cara de nuestro adversario, en este caso, un virus diminuto.» Pronuncié estas palabras en mi declaración ante un subcomité del Senado de Estados Unidos el 26 de septiembre de 1985. Hablaba del VIH, pero hoy podría decir lo mismo sobre el coronavirus al que nos estamos enfrentando.

Como todos los virus, los coronavirus son especialistas en descifrar códigos. El SARS-CoV-2 desde luego que ha descifrado el nuestro. Podemos imaginarlo como una máquina biológica inteligente que ejecuta continuamente experimentos de ADN para adaptarse al ecosistema en el que habita. Ha causado una pandemia en buena medida porque actúa sobre tres de las vulnerabilidades más humanas: nuestras defensas biológicas, nuestro comportamiento social gregario y nuestras tensiones políticas latentes.

¿Cómo se desarrollará el enfrentamiento en los próximos años y décadas? ¿Cuál será el coste humano en muertes, enfermedades prolongadas, lesiones y otros trastornos? ¿Qué eficacia tendrán las nuevas vacunas y tratamientos para contener o incluso erradicar el virus?

No se sabe. Pero varias lecciones de la larga batalla contra el VIH, el virus de la inmunodeficiencia humana que causa el sida, permiten entrever lo que se avecina. El sida es uno de los peores azotes que ha afrontado la humanidad. El VIH es un experto descifrador de códigos. A finales de 2019, la cifra mundial de fallecidos por ese virus era de unos 33 millones de personas. Se han infectado en total 76 millones de personas y se estima que cada año se suman 1,7 millones más.

Con todo, debemos apreciar lo que han logrado nuestras defensas científicas. De los casi 38 millones de portadores del VIH actuales, 25 millones reciben tratamientos antirretrovíricos completos que previenen la enfermedad y contienen el virus hasta tal punto que es poco probable que lo transmitan. Y calculo que se han evitado otros 25 millones de infecciones o más, sobre todo en África subsahariana, porque la mayoría de los países han llegado a tener acceso a estos tratamientos.

Del combate en esta guerra épica contra el sida, los médicos, los virólogos, los epidemiólogos y los expertos en salud pública han aprendido lecciones cruciales que podemos aplicar a la batalla que libramos en el presente. Hemos constatado así que las vacunas nunca constituyen una garantía, mientras que los tratamientos pueden ser nuestra arma más importante. Hemos descubierto que el comportamiento humano desempeña un papel esencial en cualquier enfermedad y que no podemos

EN SÍNTESIS

Mientras se dedican intensos esfuerzos en la lucha contra la COVID-19, todavía desconocemos la eficacia que tendrán las nuevas vacunas y tratamientos para contenerla o erradicarla. Las lecciones aprendidas en los últimos decenios sobre el sida pueden resultarnos de enorme utilidad en la actual pandemia.

Estas nos enseñan que las vacunas nunca constituyen una garantía, mientras que los tratamientos pueden ser la estrategia más eficaz; que el comportamiento humano desempeña un papel esencial en cualquier enfermedad; y que para poder aprovechar el conocimiento sobre virus anteriores es necesario financiar la investigación no solo mientras dura una pandemia, sino también cuando esta ya ha finalizado.

subestimar la naturaleza de nuestra especie. También nos hemos percatado de la importancia de aprovechar el conocimiento y las herramientas adquiridos en epidemias anteriores, una estrategia que solo es posible si continuamos financiando la investigación entre las pandemias.

DESAFÍOS DE LA VACUNA

Las primeras observaciones del comportamiento del VIH en el organismo indicaron que el camino hacia una vacuna sería largo y difícil. Al extenderse el brote, comenzamos a rastrear los niveles de anticuerpos y de linfocitos T (los glóbulos blancos que combaten a los invasores) en los infectados. Sus elevadas cifras pusieron de manifiesto que los pacientes generaban respuestas inmunitarias sumamente activas, más potentes que las nunca vistas en cualquier otra enfermedad. Pero incluso actuando a la máxima capacidad, el sistema inmunitario no era lo suficientemente fuerte como para eliminar el virus por completo.

A diferencia del virus de la poliomielitis, que «perpetra un ataque relámpago» y despierta inmunidad a largo plazo después de una infección, el VIH «llega para quedarse»: una vez que entra en el cuerpo, el patógeno permanece en él hasta que destruye el sistema inmunitario y lo deja indefenso incluso contra infecciones leves. Además, el VIH evoluciona continuamente, es un oponente astuto que busca formas de eludir nuestras respuestas inmunitarias. Aunque ello no hace imposible obtener una vacuna, sí hizo sospechar, sobre todo cuando apareció el virus en la década de 1980, que no resultaría fácil. «Por desgracia, no puede predecirse con certeza si podrá fabricarse una vacuna contra el sida alguna vez», declaré en 1988 ante la Comisión Presidencial sobre la Epidemia de VIH. «Ello no implica que sea imposible producir tal vacuna, sino que no estamos seguros de conseguirlo.» Más de 30 años después, todavía no existe una vacuna que prevenga la infección.

Por lo que hemos visto del SARS-CoV-2, este virus interactúa con el sistema inmunitario de formas complejas, asemejándose a la polio en algunos de sus comportamientos y al VIH en otros. Tras casi 60 años de observación de distintos coronavirus, sabemos que el sistema inmunitario tiene la capacidad de eliminarlos. Y parece que también es así en general con el SARS-CoV-2. Ahora bien, igual que el VIH, los coronavirus que causan el resfriado común también tienen sus trucos. La infección por uno de ellos no suele conferir inmunidad frente a la reinfección o reaparición de síntomas por la misma cepa de virus, de modo que cada temporada regresan los mismos virus del resfriado. Estos coronavirus no son de los de «ataque relámpago», como la polio, ni del tipo «llega para quedarse», como el VIH. Los denomino virus que «se contraen y después se olvidan»: una vez eliminado, el organismo tiende a olvidar que combatió a este enemigo. Los primeros estudios sobre el SARS-CoV-2 apuntan a que podría comportarse como sus primos y despertar una protección inmunitaria pasajera.

La senda hacia la vacuna contra el SARS-CoV-2 estará llena de obstáculos. Aunque algunas personas con COVID-19 producen anticuerpos neutralizantes capaces de eliminar el virus, no todo el mundo los genera. Aún se desconoce si una vacuna estimulará tales anticuerpos en todos los que la reciban. Además, no se sabe el tiempo en que esos anticuerpos protegerán de la infección. Pueden pasar dos o tres años antes de que tengamos datos en los que basarnos y podamos fiarnos de los resultados.

Otra dificultad radica en el modo en que el virus penetra en el organismo: a través de la mucosa nasal. Ninguna de las vacunas que se están desarrollando ha mostrado capacidad para prevenir infecciones a través de la nariz. En los primates no humanos, algunas evitan que la enfermedad se propague con facilidad a los pulmones. Pero tales estudios no informan demasiado sobre el funcionamiento del mismo fármaco en los humanos; la enfermedad en nuestra especie es muy diferente a la de los simios, que apenas manifiestan síntomas.

Del VIH aprendimos que los intentos de prevenir por completo la entrada del virus no dan buenos resultados, ni con el VIH ni con muchos otros virus, como los de la gripe y la polio. Las vacunas actúan más como alarmas de incendio: en lugar de evitar que este se produzca, piden ayuda al sistema inmunitario una vez se ha declarado el fuego.

El mundo ha puesto sus esperanzas en una vacuna contra la COVID-19. Es probable que los científicos anuncien un «éxito» en algún momento de este año, pero este no resulta tan sencillo como parece. Mientras redacto este artículo, las autoridades rusas comunican la aprobación de una vacuna contra la COVID-19. ¿Funcionará? ¿Será segura? ¿Será duradera? Nadie va a poder responder pronto a estas preguntas de manera convincente sobre *ninguna* vacuna de próxima aparición, tal vez hasta dentro de varios años.

Aunque hemos mejorado mucho las herramientas de la biología molecular desde los años ochenta, la parte más lenta del desarrollo de los fármacos sigue siendo ensayarlos en humanos. No obstante, la infraestructura creada para la investigación del VIH-sida está acelerando ahora el proceso de examen. Treinta mil voluntarios de todo el mundo participan en las redes creadas por los Institutos Nacionales de la Salud estadounidenses (NIH) para estudiar nuevas vacunas experimentales contra el VIH, y estas redes también se están aprovechando para los ensayos iniciales de las vacunas contra la COVID-19.

Para tratar la COVID-19, igual que el sida y el cáncer, se precisará una combinación de varios medicamentos

A la hora de tratar a un paciente que probablemente muera, los médicos aceptan el riesgo de emplear un medicamento que tal vez le provoque efectos nocivos pero aun así le salve la vida. En cambio, se inclinan menos a asumir tal riesgo cuando se trata de prevenir una enfermedad, pues la probabilidad de ocasionar un daño mayor al paciente es demasiado alta. Por este motivo, la búsqueda de una vacuna para prevenir la infección por el VIH ha ido durante décadas muy por detrás del desarrollo de fármacos para tratarla.

CENTRARSE EN LOS TRATAMIENTOS

Esos medicamentos representan ahora un ejemplo de éxito impresionante.

El primer grupo de fármacos contra el VIH fueron los inhibidores de la síntesis de ácidos nucleicos, conocidos como «terminadores de cadena». Insertan un nucleótido adicional de «terminación de cadena» en el momento en que el virus



KAREN BLEIER, GETTY IMAGES

LA COLCHA CONMEMORATIVA DEL SIDA, compuesta por 48.000 paneles, recuerda a los fallecidos por esta enfermedad.

copia su propio ARN en ADN, lo que impide la elongación de la cadena del ADN del VIH.

En los años noventa se avanzó en la combinación de medicamentos para detener la infección por el VIH poco después de que los pacientes se hubieran expuesto al virus. El primer medicamento, AZT, se aplicó de manera inmediata a los profesionales sanitarios expuestos por el pinchazo accidental con una aguja contaminada con sangre infectada. También se empleó para reducir la transmisión maternofetal. En esos años, el tratamiento prenatal de madres con sida rebajó en dos tercios el número de recién nacidos infectados. Hoy en día, la polifarmacoterapia disminuye la transmisión de madre a hijo a niveles indetectables.

El siguiente grupo de medicamentos fue el de los inhibidores de la proteasa, uno de los cuales ayudé a desarrollar. El primero se introdujo en 1995 y se combinó con otros fármacos para tratar a los pacientes. Su acción consiste en inhibir la proteasa vírica, la enzima que divide las largas proteínas precursoras del virus en sus componentes activos, más pequeños. Pero estos fármacos, así como los que inhiben las polimerasas víricas (enzimas que contribuyen a generar el ADN del virus), plantean un gran problema. El organismo humano también emplea proteasas en su funcionamiento normal y necesita polimerasas para replicar los propios ácidos nucleicos. Los mismos fármacos que inhiben las proteínas víricas también frenan nuestras propias células. La diferencia entre la concentración del fármaco que reprime las enzimas víricas y la que inhibe las humanas se denomina índice terapéutico. Representa el margen en el que el medicamento es eficaz contra el virus sin causarnos efectos secundarios excesivos. Este margen es bastante estrecho en todos los inhibidores de la polimerasa y de la proteasa.

El tratamiento de referencia actual del sida es la llamada terapia antirretrovírica, en la que el paciente toma un cóctel de al menos tres medicamentos distintos que atacan al VIH de diferentes maneras. La estrategia se basa en los logros obtenidos anteriormente en la lucha contra el cáncer. A finales de los setenta, monté un laboratorio en el Instituto de Cáncer Dana-Farber de la Universidad Harvard a fin de desarrollar nuevos productos para tratar a pacientes oncológicos. Con el tiempo, las células cancerosas generaban resistencia a los distintos medicamentos, pero las combinaciones de ellos conseguían retrasar, detener o destruir los tumores. Así pues, aplicamos al VIH la lección de la polifarmacoterapia. A principios de la década de 1990, las primeras combinaciones de tratamientos contra el sida salvaban la vida a las personas infectadas. Hoy en día, una infección no es ni mucho menos la sentencia de muerte que era; los pacientes viven ahora casi sin que les afecte el VIH, con una repercusión relativamente mínima en la esperanza de vida.

Ya sabemos que la resistencia a los fármacos individuales obstaculizará los tratamientos de la COVID-19. En los primeros estudios de laboratorio, se ha observado una rápida aparición de resistencia a productos anti-SARS-CoV-2 administrados solos. Para tratar esta enfermedad, igual que el sida y el cáncer, se precisa una combinación de medicamentos. El objetivo actual de las industrias biotecnológica y farmacéutica es desarrollar una serie de fármacos específicos y muy potentes dirigidos a distintas funciones del virus. Décadas de investigación sobre el

VIH nos muestran el camino y nos dan confianza en que con el tiempo alcanzaremos el éxito.

COMPORTAMIENTO HUMANO

A principios de los años ochenta, mientras intentábamos comprender y combatir la epidemia de sida, el médico y virólogo Robert Redfield (que en la actualidad dirige los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de Estados Unidos) y yo nos hicimos buenos amigos. Enseguida percibimos que, si bien muchos políticos de todo el mundo se negaban a reconocer la amenaza que suponía el VIH para la población, las fuerzas armadas constituían una excepción. Casi todos los países consideraban que el sida representaba un grave peligro para las tropas y su estado de preparación, que podría consumir cuantiosos fondos militares en el futuro. Redfield, entonces en el Centro Médico Militar Walter Reed, contribuyó a diseñar y gestionar un programa para detectar la infección por VIH en la totalidad de los cuerpos armados de Estados Unidos (aunque las consecuencias de esta prueba fueron controvertidas, ya que los reclutas que dieron positivo quedaron excluidos del servicio).

En aquel momento no había fármacos contra la enfermedad que mataba a más del 90 por ciento de los infectados. Cuando uno solo de los miembros de una pareja examinada estaba infectado, los médicos les recomendaban encarecidamente que emplearan preservativos. Me sorprendió saber que menos de un tercio siguió el consejo. «Si la gente no responde ante el peligro letal de mantener relaciones sexuales sin protección con su cónyuge, estamos en un verdadero apuro», pensé. Durante los cinco años siguientes, más de las tres cuartas partes de los miembros no infectados de las parejas contrajeron el VIH.

No tendríamos ninguna esperanza en derrotar a la COVID-19 si no fuera por los avances en biología molecular logrados en las batallas anteriores contra otros virus

Siempre he utilizado esa experiencia como guía para comparar la esperanza con la realidad. La sexualidad humana (el impulso por el sexo y el contacto físico) está profundamente arraigada en nuestra naturaleza. Sabía que en los años ochenta era muy poco probable que las personas cambiaran su conducta sexual de manera importante. En el siglo XIX todo el mundo conocía cómo se contraía la sífilis y que era una enfermedad grave. Sin embargo, por lo menos entre el 10 y el 15 por ciento de los ciudadanos estadounidenses seguían contagiándose de este mal a principios del siglo XX. No es que ignoraran cómo se transmitía, sino que no cambiaban su estilo de vida para evitarlo.

También existe una dinámica sexual en la COVID-19 que no suele mencionarse. Forma parte de lo que impulsa a la gente a salir de casa e ir a bares y fiestas. Quien tenga ganas de tomar una cerveza puede saciar la sed en la seguridad de su propio hogar, pero la satisfacción de otros deseos no es tan fácil, sobre todo cuando uno es joven, soltero y vive solo. Las estrategias de salud pública no deben pasar este hecho por alto.

Lo que aprendimos durante la epidemia del VIH para ayudar a los jóvenes a modificar su comportamiento es hoy igual de válido para la COVID-19: conoce tu riesgo, conoce a tus parejas y toma las precauciones necesarias. Muchos jóvenes actúan con la falsa presunción de que, incluso si se infectan, no enfermarán gravemente. No solo esta creencia es errónea, sino que hasta aquellos con infecciones asintomáticas pueden sufrir daños graves y duraderos. Por tanto, cuantas más personas entiendan el riesgo, los jóvenes en especial, más probable será que tomen las medidas necesarias para protegerse a sí mismos y a los demás. Es lo que sucedió con el sida.

FINANCIACIÓN

Cuando pregunto a expertos internacionales qué saben acerca de los pormenores de la biología molecular del SARS-CoV-2 o, es más, de cualquier otro coronavirus, no conocen las respuestas que deberían. ¿Por qué? Porque los Gobiernos y la industria cancelaron la financiación de la investigación de los coronavirus en 2006, una vez contenida la primera pandemia de SARS (síndrome respiratorio agudo grave) y, de nuevo, en los años inmediatamente posteriores al brote de MERS (síndrome respiratorio de Oriente Medio, también causado por un coronavirus), cuando parecía ser controlable. En todas partes, no solo en Estados Unidos, sino también en China, Japón, Singapur, Hong Kong y Oriente Medio (los países afectados por el SARS y el MERS), los organismos encargados de la financiación subestimaron la amenaza de los coronavirus. A pesar de las claras advertencias, persistentes y estentóreas, de muchos de los que lucharon en primera línea contra el SARS y el MERS, los fondos se agotaron. El desarrollo de fármacos prometedores contra ambos, que también podrían haber sido activos contra el SARS-CoV-2, quedó inconcluso por falta de dinero.

Con 1,3 millones de muertos y 55 millones de infectados en todo el mundo al cierre de esta edición, tenemos muy buenas razones para agilizar la financiación. La pasada primavera, Estados Unidos abrió enseguida el grifo del capital para la investigación con objeto de acelerar los descubrimientos de vacunas y medicamentos. Pero ¿será suficiente?

La crisis del VIH nos enseñó la importancia de contar con líneas de investigación ya establecidas. La investigación del cáncer en los años cincuenta, sesenta y setenta del pasado siglo sentó las bases para los estudios del VIH y del sida. El Gobierno estadounidense respondió a la preocupación pública con un drástico aumento de la financiación federal para la investigación del cáncer durante esas décadas. Aquellos esfuerzos culminaron con la aprobación por el Congreso de la Ley Nacional del Cáncer del presidente Richard Nixon en 1971. Con esta consignación de 1600 millones de dólares (que equivaldrían hoy a 10.000 mil millones) para la investigación oncológica, se obtuvieron los conocimientos científicos necesarios para identificar y comprender el VIH en la década de 1980, aunque, por supuesto, nadie sabía que daría esos frutos.

En esa época, el Gobierno de Reagan no quería hablar del sida ni asignar demasiados fondos públicos a su investigación. La primera vez que el presidente Ronald Reagan pronunció un discurso importante sobre el sida fue en 1987. En su primer Gobierno, la financiación para la investigación del VIH fue escasa; pocos científicos estaban dispuestos a comprometer su carrera por descifrar la biología molecular del virus. Sin

embargo, una vez que se conoció la noticia de que el actor Rock Hudson estaba gravemente enfermo de sida, el jefe del grupo republicano del Senado, Ted Stevens, se unió al senador demócrata Ted Kennedy, a la actriz Elizabeth Taylor, a mí mismo y a otros en una campaña que consiguió sumar 320 millones de dólares al presupuesto de 1986 para la investigación del sida. Los líderes republicanos del Senado Barry Goldwater, Jesse Helms y John Warner nos apoyaron. El dinero fluyó y destacados científicos se nos unieron. Intervine en el diseño de este primer programa de investigación sobre el sida financiado por el Congreso de los Estados Unidos, en colaboración con Anthony Fauci, el médico que ahora lidera la lucha de nuestro país contra la COVID-19. (Y si hay alguien en el mundo que ha hecho la mayor contribución a la prevención y el tratamiento del sida, ese es Fauci.)

Una diferencia entre aquellos años y la actualidad es que los miembros republicanos del Congreso estaban más dispuestos a plantar cara al presidente y al personal de la Casa Blanca por no tomar las medidas necesarias para combatir una enfermedad mundial. Por ejemplo, Stevens decidió asumir la tarea de proteger de la infección por el VIH, en la medida de lo posible, a las Fuerzas Armadas y los Servicios Secretos de la nación. Contribuyó a reasignar 55 millones de dólares del presupuesto de defensa para consignarlos a la detección del VIH y del sida en los reclutas.

Nuestras herramientas para la investigación farmacéutica y de virus han mejorado enormemente en los últimos 36 años desde que se descubrió el VIH. Este es uno de los motivos por los que estoy convencido de que tendremos medicamentos antivíricos para tratar la COVID-19 el año que viene, o incluso antes. Lo que se tardaba cinco o diez años en los ochenta y los noventa, en muchos casos se consigue ahora en cinco o diez meses. Tenemos la capacidad de identificar y sintetizar rápidamente sustancias que nos permiten predecir los fármacos que resultarán eficaces. Gracias a la criomicroscopía electrónica podemos explorar estructuras víricas y simular interacciones moleculares en cuestión de semanas, algo que solía llevar años. La máxima es no bajar nunca la guardia a la hora de financiar la investigación contra los virus. No tendríamos ninguna esperanza de derrotar a la COVID-19 si no fuera por los avances en biología molecular logrados en las batallas anteriores contra ellos. Lo que aprendamos ahora nos servirá en la próxima pandemia, pero es imprescindible mantener las aportaciones económicas.

UN SALTO A LA OSCURIDAD

En noviembre de 2019 pasé varios días en Wuhan presidiendo una reunión de la Cumbre de Salud entre Estados Unidos y China. La principal preocupación de nuestro grupo era la amenaza de restricciones en la comunicación de descubrimientos científicos que se cernía en medio de la guerra comercial entre los dos países. Por lo demás, fue un momento encantador en una bonita ciudad.

Semanas después, de vuelta a casa en la ciudad de Nueva York, seguía aquejado de un resfriado persistente que contraje en el viaje a Wuhan. (Más tarde di negativo en anticuerpos contra la COVID-19, pero ese resultado no es definitivo.) El director de mi fundación en China me llamó un día con una noticia terrible. Tres de sus abuelos habían fallecido por un virus desconocido. «Quien lo contrae, enferma gravemente», aseguró mi colaborador, de unos 35 años. «Todo está cerrado. Ni siquiera puedo asistir a los funerales de mis abuelos.»

Al cabo de pocas semanas, me enteré de primera mano sobre la enérgica respuesta de China a la epidemia en un vívido relato de otro colaborador que acababa de pasar 14 días de aislamiento en un hotel en cuarentena. Me explicaba que unos días después de que un pasajero que viajaba en la parte posterior de su vuelo de Fráncfort a Shanghái diera positivo en coronavirus, los rastreadores llamaron a mi amigo para pedirle que permaneciera aislado. Desde entonces, su único contacto humano era con los inspectores vestidos con trajes de protección que acudían a diario para desinfectar su habitación y llevarle las comidas.

Estamos empezando a vislumbrar las posibles consecuencias a largo plazo de la COVID-19. Es un virus nuevo, por lo que no tendremos una idea más clara hasta dentro de unos años, pero sabemos que serán enormes. Apenas hemos explorado la superficie de la biología molecular de los coronavirus. ¿Qué contarán nuestros hijos y nietos sobre nuestros éxitos como científicos y como sociedad, y sobre nuestros fracasos, para contener esta pandemia, la peor a la que nos hemos enfrentado desde hace cien años?

La ciencia se adentra en la oscuridad, hasta el verdadero límite del conocimiento humano. Aquí, al igual que en las profundidades de una caverna, empezamos a excavar un muro de dura roca. No sabemos lo que encontraremos al otro lado. Algunas personas le dedican toda la vida y solo acumulan un montón de piedras. Puede que nos espere una pandemia prolongada, o quizá tengamos suerte y logremos desarrollar pronto tratamientos y vacunas eficaces. Pero ya hemos estado aquí antes, frente a un enemigo vírico desconocido, y podemos apoyarnos en las lecciones aprendidas. Esta no es la primera pandemia ni será la última. IyC

PARA SABER MÁS

Development of antiviral drugs for the treatments of AIDS: Strategies and prospects. William A. Haseltine en *Journal of Acquired Deficiency Syndromes*, vol. 2, n.º 4, págs. 311-334, agosto de 1989.

Mechanisms of infectivity and replication of HIV-1 and implications for therapy. Ernest F. Terwilliger, Joseph G. Sodroski y William A. Haseltine en *Annals of Emergency Medecine*, vol. 19, n.º 3, págs. 233-241, marzo de 1990.

EN NUESTRO ARCHIVO

Biología molecular del virus del sida. William A. Haseltine y Flossie Wong-Staal en IyC, diciembre de 1988.

Fármacos contra virus. William A. Haseltine en *IyC*, enero de 2002.



LA MATERIA OSCURA A LA LUZ DE LOS RAYOS GAMMA

La luz más energética del universo podría esconder la clave para descifrar uno de los grandes misterios de la cosmología

Javier Coronado Blázquez y Miguel Ángel Sánchez Conde

HACE CASI UN SIGLO que los astrónomos saben que la mayor parte de la masa existente en el universo no se compone de átomos, sino de materia oscura, una misteriosa sustancia que no absorbe ni emite luz. Sin embargo, en algunos lugares, como el centro galáctico (*imagen*), la materia oscura podría revelar su naturaleza en forma de sutiles destellos de rayos gamma. Hace años que los físicos intentan encontrar esa codiciada aguja en el pajar de la Vía Láctea.

Javier Coronado Blázquez y **Miguel Ángel Sánchez Conde** investigan en el Instituto de Física Teórica, un centro mixto de la Universidad Autónoma de Madrid y el CSIC. Su trabajo se centra en la búsqueda de materia oscura con rayos gamma.



Cuando miramos el cielo nocturno, la mayor parte de él es de un negro absoluto. Destacan solo unos cuantos puntos luminosos: estrellas y, tal vez, algunos de los planetas de nuestro sistema solar. Si tenemos la suerte de vivir en el lugar apropiado o de contar con la ayuda de unos prismáticos o de un pequeño telescopio, podremos distinguir cientos o incluso miles de esos puntos de luz. No obstante, estos seguirán siendo minoría frente al oscuro mar de fondo. Un telescopio mayor comenzará a revelarnos un número muy elevado de fuentes luminosas allí donde antes no veíamos nada, sobre todo estrellas tenues y galaxias lejanas. Pero, a pesar de todo, la mayor parte del firmamento seguirá vistiendo un profundo negro.

Es tentador pensar que eso indica que el universo se encuentra esencialmente vacío. Y aunque esto podría ser correcto hasta cierto punto, para sorpresa mayúscula, resulta que todo lo que podemos ver tan solo constituye el 5 por ciento del universo. El 70 por ciento corresponde a la llamada energía oscura, responsable de la expansión acelerada del cosmos. Y el 25 por ciento restante —cinco veces más que la materia ordinaria que todos conocemos y amamos— es materia oscura: una sustancia invisible y de naturaleza desconocida que, sin embargo, delata su presencia por el tirón gravitatorio que ejerce sobre las estrellas y las galaxias.

Desde los años treinta del siglo xx, y especialmente desde la década de los setenta, hemos acumulado una abrumadora cantidad de pruebas sobre la existencia de materia oscura, desde la manera en que se mueven las estrellas dentro de una galaxia hasta las propiedades del fondo cósmico de microondas, la radiación que fue emitida poco después de la gran explosión. Todo ello ha servido para perfilar el modelo cosmológico estándar, la teoría usada actualmente por los físicos para describir la evolución del universo. No en vano, este modelo se conoce como ΛCDM, donde Λ hace referencia a la energía oscura y CDM proviene de las siglas en inglés de «materia oscura fría». Ello se debe a que pensamos que la materia oscura se compone de algún tipo de partículas hasta ahora desconocidas, y todos los datos indican que tales partículas han de moverse a velocidades muy inferiores a la de la luz, razón por la que decimos que es «fría».

Pero si la materia oscura se compone de partículas, ¿por qué no podemos verlas? La razón es que tales partículas serían muy distintas de todas las que conocemos hasta ahora y, en concreto, no experimentarían la interacción electromagnética. Como consecuencia, no podrían emitir, absorber ni reflejar luz, por lo que serían literalmente invisibles. De hecho, tal vez la materia oscura debería en realidad llamarse, de forma mucho más intuitiva, «materia transparente». Pero, aunque no podamos verla, el papel desempeñado por la materia oscura en la evolución del universo es tan relevante que, sin ella, no llegarían a formarse las grandes estructuras como las galaxias y muy posiblemente no estaríamos aquí hoy.

EN SÍNTESIS

La mayor parte de la masa del universo se compone de materia oscura, una sustancia de naturaleza desconocida. La hipótesis más aceptada postula que dicha sustancia consta de partículas que apenas interaccionarían con el resto.

En las raras ocasiones en que las partículas de materia oscura chocasen entre sí, podrían emitir tenues destellos de rayos gamma. En la última década, distintos observatorios han estado explorando el cielo en busca de esas señales.

Hasta hoy se han detectado algunas señales procedentes del centro galáctico, pero su interpretación no está clara. Ahora, una nueva estrategia propone estudiar los «subhalos» de la Vía Láctea: pequeñas regiones que solo contendrían materia oscura.

PÁGINAS ANTERIORES: NASA/LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO/INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE CALIFORNIA/SUSAN STOLOVY ET AL.



EL SATÉLITE FERMI, de la NASA, ha estado cartografiando el cielo en rayos gamma desde 2008. En los últimos años, numerosos estudios han usado los datos de este y otros observatorios para buscar posibles señales de materia oscura en la Vía Láctea.

NASA

Desde la humildad del científico, creemos justo decir que, tras décadas de estudios observacionales, es mucho lo que sabemos sobre la materia oscura: su abundancia cosmológica, que no puede tener carga eléctrica, que sus partículas apenas colisionan... Sin embargo, su naturaleza última sigue siendo totalmente desconocida. Hay incluso quienes defienden que no existe una materia oscura como tal y que, para dar cuenta de las observaciones, basta con modificar las leyes de la gravedad. Sin duda, resulta lógico intentar explicar los datos a partir de la materia que ya conocemos. Pero, en la práctica, tales modificaciones de la gravedad no logran dar cuenta de todos los efectos observados a distintas escalas y épocas cósmicas, acarrean múltiples problemas adicionales y, paradójicamente, en la actualidad han evolucionado hasta requerir también una cierta cantidad de materia oscura.

UN NUEVO TIPO DE PARTÍCULA

Ninguna de las partículas elementales conocidas hasta ahora constituye un candidato viable para explicar las propiedades de la materia oscura. Por tanto, resulta inevitable pensar en nuevas partículas e interacciones. Y, de hecho, tan pronto como consideramos ciertas extensiones del modelo estándar de la física de partículas, aparecen cientos de candidatos viables.

Las posibilidades para explicar la materia oscura son múltiples, desde partículas miles de millones de veces más ligeras que el electrón, como los axiones, hasta agujeros negros primordiales tan masivos como el propio Sol. Con todo, la hipótesis más explorada y seguramente mejor motivada hasta ahora es la que postula que la materia oscura se compone de WIMP, siglas en inglés de «partículas masivas que interaccionan débilmente». Esta denominación no hace referencia a un tipo preciso de partícula, sino a un amplio abanico de posibilidades. Todas ellas, sin embargo, comparten las dos características básicas a las que remite su nombre: se trata de partículas con masas relativamente elevadas (en un caso típico, varias decenas de veces más masivas que un protón) y que apenas interaccionan (lo que justificaría por qué, en la práctica, no podemos detectarlas más allá de sus efectos gravitatorios).

Las WIMP constituyen una de las posibilidades preferidas por los físicos de partículas, ya que aparecen de manera natural en las extensiones supersimétricas del modelo estándar. Estas teorías han sido estudiadas de manera independiente desde hace décadas debido a que presentan un gran potencial para resolver varios rompecabezas teóricos. Postulan que, por cada bosón y cada fermión conocidos (las dos grandes familias de partículas existentes en la naturaleza), debería existir una nueva partícula perteneciente al tipo contrario. Eso implica que aún quedaría un gran número de partículas elementales por descubrir y, en muchos modelos, una de tales partículas resulta ser precisamente de tipo WIMP.

Otro argumento a favor de las WIMP proviene de la evolución del universo. En sus inicios tras la gran explosión, a medida que el cosmos se expandía, la densidad de partículas de materia oscura habría ido disminuyendo. En cierto momento, esa densidad alcanzó un valor tan bajo que las partículas dejaron de «verse» unas a otras; es decir, dejaron de colisionar entre sí. En el caso de las WIMP, colisionar implica aniquilarse, ya que, según las teorías que las predicen, ellas mismas son sus propias antipartículas. Por tanto, llegó un momento en el que su abundancia se «congeló» y la cantidad de partículas de materia oscura permaneció constante. El instante concreto en que eso ocurrió (y, en consecuencia, el número de partículas que sobrevivieron) depende de la probabilidad de interacción entre partículas de materia oscura. Y resulta que, para dar cuenta de toda la materia oscura que hoy sabemos que existe en el universo, dicha intensidad ha de ser similar a la de las interacciones nucleares débiles: justo lo que predice el modelo WIMP. Esta interesante coincidencia se conoce con el nombre de «milagro WIMP» y constituye el argumento principal sobre el que se fundamenta el éxito de este modelo frente a otros.

TRES ESTRATEGIAS PARA DETECTAR WIMP

Cuando dos WIMP chocan, se aniquilan produciendo partículas ordinarias. Y dado que en física de partículas (casi) todo es reversible, también debería ser posible inducir el proceso inverso: generar WIMP al hacer colisionar partículas conocidas. Este mecanismo de producción de WIMP constituye una de las estrategias de búsqueda de materia oscura. Los aceleradores de partículas, como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, en Ginebra, llevan años buscando una señal de este tipo.

Hasta ahora, sin embargo, no han encontrado ningún indicio de que, al hacer chocar partículas ordinarias, se produzcan partículas de materia oscura.

Otro de los métodos de búsqueda de WIMP es el conocido como «detección directa». La Vía Láctea se halla inmersa en una descomunal nube de materia oscura, por lo que billones de WIMP deberían atravesar todo lo que nos rodea cada segundo. No sentimos sus efectos ya que la probabilidad de que interaccionen con las partículas ordinarias es extremadamente baja. Sin embargo, en alguna rara ocasión, una WIMP sí podría colisionar contra un átomo. Eso generaría una minúscula señal que, en principio, podría ser registrada con los instrumentos adecuados. Estas búsquedas son harto complejas desde el punto de vista técnico, ya que el ruido de fondo debido a las colisiones habituales de los átomos es enorme, lo que obliga a aislar a la perfección los experimentos. A pesar de ello, en la actualidad existe un buen número de proyectos en todo el mundo que, con distintos métodos, han logrado una sensibilidad sin precedentes para detectar las posibles interacciones entre WIMP y la materia ordinaria. Hasta hoy, sin embargo, esta estrategia de búsqueda tampoco ha aportado ningún resultado concluyente.

Por último, existe otra estrategia de búsqueda de WIMP, que, al contrario que las anteriores, no se basa en producir partículas de materia oscura ni en detectarlas directamente en el laboratorio. En su lugar, intenta observar las partículas ordinarias que deberían producirse cuando, en el espacio, dos WIMP colisionan y se aniquilan entre sí. Aunque tales choques entre WIMP sean muy improbables, deberían producirse ocasionalmente en aquellos lugares donde la densidad de materia oscura es especialmente elevada, como el centro galáctico. Esta estrategia se conoce como «detección indirecta» y, en esencia, consiste en mirar al cielo para buscar esos productos de aniquilación. Estos pueden ser en principio de tres tipos: rayos cósmicos (partículas dotadas de carga eléctrica), neutrinos y rayos gamma, la luz más energética del universo. Esperamos observar este tipo de radiación debido a la elevada masa de las WIMP. Si las partículas de materia oscura fuesen más ligeras, en lugar de rayos gamma se emitiría luz de menor energía, como rayos X o luz ultravioleta.

El uso de rayos cósmicos y neutrinos en la búsqueda WIMP conlleva ciertos problemas. Los primeros se desvían por los campos magnéticos debido a que poseen carga eléctrica, lo que hace extremadamente complicado rastrear su origen (un requisito clave para poder atribuirlos inequívocamente a aniquilaciones de materia oscura). Los neutrinos, por su parte, apenas interaccionan con la materia ordinaria, por lo que detectarlos constituye una tarea titánica. Aunque posible, la sensibilidad de los experimentos de neutrinos actuales dista de ser óptima para estas búsquedas. Por el contrario, los rayos gamma carecen de carga eléctrica y resultan mucho más fáciles de detectar.

TÉCNICAS DE DETECCIÓN

Partículas oscuras

Hasta ahora, la hipótesis más estudiada postula que la materia oscura se compone de WIMP, siglas en inglés de «partículas masivas que interaccionan débilmente». Estas partículas serían sus propias antipartículas y, aunque apenas interaccionarían, en las raras ocasiones en que lo hicieran se aniquilarían y darían lugar a partículas ordinarias (*esquema*). En la actualidad, numerosos experimentos exploran el cielo en busca de esos productos de desintegración.

WIMP
Rayos cósmicos
Neutrinos
WIMP
Rayos gamma

Las aniquilaciones de WIMP pueden dar lugar a rayos cósmicos (partículas con carga eléctrica), neutrinos o rayos gamma. Los primeros se ven desviados por los campos magnéticos, por lo que resulta muy complicado rastrear su origen, mientras que los segundos son extremadamente difíciles de detectar. Por ello, los rayos gamma se consideran la opción más prometedora para buscar aniquilaciones de materia oscura.

RAYOS GAMMA CELESTES

A lo largo de las últimas dos décadas, la puesta en funcionamiento de distintos observatorios de rayos gamma ha permitido explorar el escenario WIMP. Los rayos gamma constituyen la radiación electromagnética más energética del universo y, de hecho, su longitud de onda es tan corta que resulta imposible focalizarlos con una lente. Como consecuencia, las técnicas para detectar fotones gamma son más similares a las que se emplean en los aceleradores de partículas que a las usadas habitualmente en astronomía.

Existen telescopios gamma terrestres y espaciales. Los primeros se conocen como «telescopios Cherenkov», ya que se basan en la detección de la radiación homónima. Esta luz se produce cuando, en un medio material (como el aire o el agua, por ejemplo), una partícula avanza a una velocidad mayor que la de la luz en dicho medio. En el caso de los telescopios Cherenkov, el medio en que se produce esa radiación es la atmósfera terrestre. Cuando un rayo gamma procedente del espacio impacta contra los átomos de las capas altas de la atmósfera, se genera una cascada de miles de partículas secundarias. Esas partículas son tan energéticas que su velocidad supera la de la luz en el aire. Dicho fenómeno emite un breve destello de luz azulada (la radiación de Cherenkov) que los telescopios pueden detectar y, a partir de ella, reconstruir las propiedades del rayo gamma incidente. En la actualidad existen tres grandes proyectos de este tipo: MAGIC, en la isla de la Palma y coliderado por científicos españoles; la colaboración franco-alemana H.E.S.S, en Namibia; y la anglo-estadounidense VERITAS, en Arizona. En los próximos años entrará en funcionamiento la Red de Telescopios Cherenkov (CTA), llamada a ser el futuro de este campo, la cual contará con un observatorio en las islas Canarias y otro en el desierto chileno de Atacama [*véase* «La Red de Telescopios Cherenkov», por Juan Cortina y Manel Martínez; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2016].

En cuanto a los observatorios de rayos gamma en órbita, cabe destacar el Telescopio de Gran Área (LAT) a bordo del satélite Fermi, de la NASA. En el espacio no hay un ningún medio que produzca luz Cherenkov, por lo que la técnica de detección es muy distinta. En este caso, el rayo gamma incidente impacta contra una serie de planchas de silicio y, debido a su alta energía, se convierte en un par electrón-positrón. Al medir la dirección



LA GALAXIA ENANA esferoidal de Fornax (*fotografía*) es una de las galaxias satélite que orbitan en torno a la Vía Láctea. Estas pequeñas galaxias poseen una enorme proporción de materia oscura, por lo que se consideran lugares ideales donde buscar rayos gamma procedentes de desintegraciones de WIMP.

y la energía de ese par de partículas según se propagan en el detector, pueden reconstruirse las propiedades del rayo gamma original. La principal ventaja de Fermi-LAT es su amplísimo campo de visión, que abarca aproximadamente un quinto del cielo. Sumado al movimiento del telescopio, ello le permite barrer toda la esfera celeste en tan solo tres horas. Tras más de una década de operación, Fermi ha logrado confeccionar el mapa del cielo en rayos gamma más preciso hasta la fecha [*véase* «Una nueva imagen del universo violento», por Alberto Domínguez; Investigación y Ciencia, marzo de 2018].

Los telescopios terrestres y espaciales se complementan en varios aspectos. Por ejemplo, Fermi-LAT es sensible a energías comparativamente más bajas que los telescopios Cherenkov, de forma que a las energías en las que aquel comienza a perder sensibilidad (unas pocas decenas de gigaelectronvoltios), los telescopios Cherenlov empiezan a ser más sensibles. Y mientras que estos últimos presentan una mayor resolución angular, lo logran a costa de apuntar a un sitio concreto del firmamento. Los instrumentos espaciales, en cambio, son capaces de observar regiones del cielo mucho mayores de una sola vez.

Por supuesto, existen todo tipo de procesos astrofísicos que también emiten rayos gamma: remanentes de supernova, algunas estrellas binarias, púlsares... Por tanto, si nuestro objetivo es detectar rayos gamma producidos por aniquilaciones de materia oscura, lo primero que hemos de tener es una predicción de los rayos gamma «ordinarios» que esperamos observar en cada región del cielo, a fin de poder comparar los datos e identificar posibles discrepancias. Además, también hemos de saber dónde buscar aniquilaciones de WIMP; es decir, en qué zonas del cielo cabría observarlas con mayor probabilidad.

Todos los datos y modelos sobre la distribución de materia oscura, respaldados por potentes simulaciones por ordenador, indican que las señales más intensas de aniquilación de WIMP deberían provenir del centro de nuestra galaxia. Ello se debe a que la densidad de materia oscura es allí mayor que en otras zonas de la Vía Láctea, y además se encuentra relativamente próximo a nosotros. Por desgracia, esta región contiene también una gran cantidad de objetos que emiten rayos gamma por medio de procesos ordinarios, cuya señal puede confundirse fácilmente con la predicha para las aniquilaciones de WIMP. Como consecuencia, buscar materia oscura en el centro galáctico constituye una tarea tan difícil como buscar una aguja en un pajar.

Pese todas esas complicaciones, son numerosos los grupos de investigación que, en los últimos años, han buscado aniquilaciones de WIMP en el centro galáctico. Y, de hecho, una vez que modelizamos toda la emisión gamma ordinaria que esperamos encontrar en esta región, Fermi-LAT detecta un exceso de radiación de origen incierto. Entre otros autores, Lisa Goodenough, de la Universidad de Nueva York, y Dan Hooper, del Fermilab, analizaron dicho exceso en 2009. No solo eso, sino que las características tanto espaciales como espectrales de la señal resultan ser muy similares a las que cabría observar si se tratase de aniquilaciones de materia oscura. Por otro lado, varios trabajos recientes, como uno publicado en 2016 por Richard Bartels, Suraj Krishnamurthy y Christoph Weniger, de la Universidad de Ámsterdam, han argumentado que dicha señal podría deberse a una población de púlsares no descubierta hasta la fecha. No obstante, es justo decir que el debate sobre el exceso de rayos gamma en el centro de la Vía Láctea sigue abierto.

Aparte del centro galáctico, otro de los lugares más prometedores para la búsqueda indirecta de materia oscura son las galaxias enanas esferoidales. Con una masa equivalente a la de «solo» un millón de soles o menos (en comparación con la de nuestra galaxia, de unos 100.000 millones de soles), estas pequeñas galaxias

LA MATERIA OSCURA forma descomunales nubes, o «halos», en cuyo centro se asientan las galaxias. Esta simulación por ordenador del proyecto Aquarius, del Instituto Max Planck de Astrofísica de Garching, muestra cómo se distribuye la materia oscura alrededor de nuestra galaxia. La Vía Láctea (*no mostrada*) se alojaría en la región central brillante. A su alrededor pueden verse numerosos «subhalos»: concentraciones de materia oscura con tamaños diversos, muchas de las cuales no contendrían ni gas ni estrellas. En los últimos años, estas estructuras se han revelado como candidatos muy prometedores para buscar aniquilaciones de WIMP.

CORTESÍA DE VOLKER SPRINGEL/INSTITUTO MAX PLANCK DE ASTROFÍSICA DE GARCHING

orbitan en torno a la nuestra tal y como la Luna lo hace alrededor de la Tierra. Y, a juzgar por el movimiento de las estrellas que contienen, sabemos que poseen una proporción descomunal de materia oscura: si en nuestra galaxia se estima que hay unas diez veces más materia oscura que luminosa, en el caso de las galaxias satélites esperamos que haya varios cientos de veces más. En los últimos años, numerosos estudios han intentado detectar señales de aniquilación de WIMP en varias galaxias satélite de la Vía Láctea, como Draco o Segue 1. Hasta ahora, sin embargo, tampoco se ha encontrado ninguna señal concluyente.

SUBHALOS DE MATERIA OSCURA

Además del centro galáctico y de las galaxias satélite de la Vía Láctea, hay otras regiones del cielo que, en los últimos años, se han mostrado prometedoras para la búsqueda de aniquilaciones de WIMP. Tales zonas son los «subhalos» de materia oscura que, según todos los modelos y simulaciones, deberían distribuirse por nuestra galaxia.

El modelo cosmológico estándar nos dice que las primeras estructuras gravitatorias que se formaron en el universo fueron grandes halos de materia oscura. Estos actuaron como pozos gravitatorios que, con el tiempo, fueron atrapando materia ordinaria hasta dar lugar a las galaxias y cúmulos de galaxias que vemos hoy. Un aspecto inherente al modelo ΛCDM es que primero se forman las estructuras de menor tamaño, y luego, a medida que estas se agrupan, otras mayores. Por tanto, una consecuencia natural es que los halos de materia oscura en los que se asientan las galaxias han de contener un buen número de subhalos, los cuales incluirán a su vez otros subhalos aún menores, y así sucesivamente.

La distribución de masas de estos subhalos sigue una ley de potencias, lo que implica que, cuanto más pequeños son, más abundan. Así, mientras que en nuestra galaxia debería haber uno o dos subhalos con una masa del orden del 1 por ciento de la de la Vía Láctea, tendrían que existir millones con masas cada vez menores. Aquellos con masas de unos 1000 millones de masas solares son los que hospedan las galaxias satélite que mencionábamos con anterioridad. Pero, por debajo de los 10 millones de masas solares, los subhalos son demasiado pequeños para retener gas y estrellas, por lo que únicamente constarían de materia oscura. Por tanto, ¡escaparían por completo a nuestros telescopios! Esperamos que el cielo esté repleto de ellos; sin embargo, al no albergar materia visible, no podemos verlos.

No obstante, existe una emocionante posibilidad. Si la materia oscura se compone de WIMP, sus aniquilaciones podrían delatar la existencia de esos subhalos. En tal caso, veríamos destellos de rayos gamma «salidos de la nada», puesto que no estarían asociados a emisiones en ninguna otra longitud de onda. En otras palabras: aparecerían como fuentes no identificadas en los catálogos celestes de rayos gamma.

Estos catálogos incluyen todo tipo de objetos astrofísicos como púlsares, núcleos activos de galaxias, remanentes de supernova, regiones de formación estelar... Para identificar de qué tipo de fuente se trata, se combinan los datos de Fermi con los recabados por otros telescopios en distintas longitudes de onda. Sin embargo, y pese a numerosos esfuerzos, de todas las fuentes de rayos gamma localizadas hasta ahora, cerca de un 30 por ciento (unas 1500) siguen sin identificar. ¿Podría alguna de ellas corresponder a uno de los pequeños subhalos de materia oscura que esperamos encontrar en la vecindad del Sol?

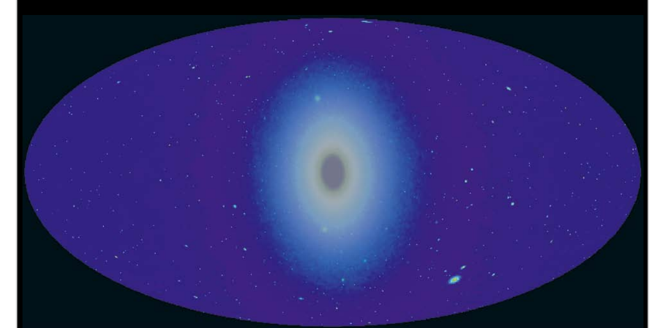
Estos subhalos ligeros, desprovistos de gas y estrellas, son predichos con rotundidad por el modelo cosmológico estándar. Pero, al no poder observarlos directamente, los astrofísicos debemos basarnos en simulaciones para entender sus propiedades. Y aunque tales simulaciones se llevan a cabo en superordenadores, la potencia computacional disponible hoy en día no basta para resolver toda la población de subhalos, incluidos los de menor masa. En concreto, las simulaciones actuales no consiguen resolver subhalos de menos de un millón de masas solares. Y estos se quedan aún muy lejos de los subhalos más pequeños que predice el modelo ΛCDM, los cuales pueden llegar a tener una masa similar a la de la Tierra.

Con todo, existen argumentos teóricos suficientes para estimar la distribución y características de los subhalos más pequeños. Un resultado muy relevante es que muchos de los subhalos

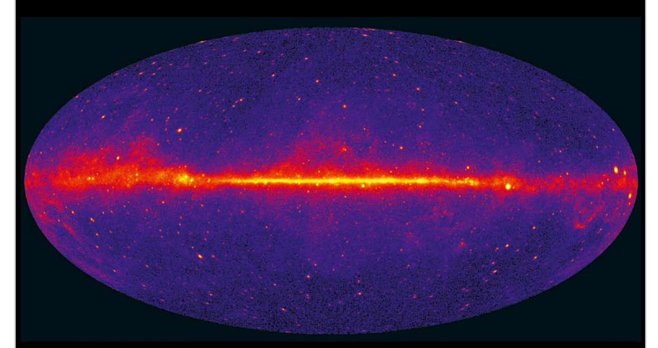
BÚSQUEDA DE SUBHALOS

Fuentes sin identificar

Si la materia oscura se compone de WIMP, cabe la posibilidad de que los subhalos de materia oscura (*véase la imagen de la página anterior*) emitan tenues destellos de rayos gamma. De ser el caso, estos subhalos aparecerían en los catálogos celestes de rayos gamma (*abajo*) como fuentes sin identificar; es decir, no asociadas a ningún objeto astrofísico conocido.



Estimación a partir de la simulación Aquarius (*página anterior*) de las emisiones de rayos gamma que deberían verse en el cielo como consecuencia de las aniquilaciones de partículas de materia oscura en el centro galáctico y en los subhalos de la Vía Láctea. La imagen muestra toda la esfera celeste según se vería desde la Tierra; los colores indican la intensidad relativa de las emisiones de rayos gamma.



Mapa celeste de rayos gamma obtenido por el telescopio Fermi. Las fuentes de rayos gamma se indican en tonos rojos y amarillos; la franja central corresponde al plano de la Vía Láctea. De todas las fuentes detectadas por Fermi, unas 1500 siguen sin identificar. En la mayoría de los casos, sin embargo, sus propiedades no parecen ser compatibles con las que cabría esperar si estuviesen causadas por aniquilaciones de WIMP en subhalos de materia oscura.

CORTESÍA DE VOLKER SPRINGEL/INSTITUTO MAX PLANCK DE ASTROFÍSICA DE GARCHING (*aniquilaciones de materia oscura*); NASA/DEPARTAMENTO DE ENERGÍA/COLABORACIÓN FERMI-LAT (*mapa de fuentes*)

de menor tamaño deberían encontrarse «muy cerca» de nuestro planeta. Tanto, de hecho, que la posible señal en rayos gamma debida a la aniquilación de materia oscura en ellos podría ser equiparable, o incluso mayor, que la que esperaríamos detectar en las galaxias satélites esferoidales, las cuales habían sido hasta ahora el objeto de estudio preferido por la comunidad. La ventaja de las galaxias satélite es que sabemos dónde se encuentran, puesto que albergan estrellas. Sin embargo, los subhalos ligeros son totalmente invisibles. Por tanto, para localizarlos hemos de usar un telescopio de rayos gamma que sea capaz de observar todo el cielo, como Fermi-LAT, y analizar con detalle todas aquellas fuentes de rayos gamma que hoy en día siguen sin identificar.

LA BÚSQUEDA DE SUBHALOS CON FERMI-LAT

Así pues, partimos de unas 1500 fuentes de rayos gamma no identificadas en el último catálogo de Fermi-LAT. Al menos en principio, todas ellas podrían ser subhalos de materia oscura, por lo que resulta deseable establecer algún criterio que nos permita clasificarlas. Al respecto, existen varios filtros que podemos aplicar.

Por ejemplo, una parte de esas fuentes gamma son variables; es decir, el flujo de fotones que nos llega de ellas cambia con el tiempo. Sin embargo, un hipotético flujo causado por la aniquilación de WIMP en un subhalo de materia oscura debería ser muy estable en el tiempo. Como consecuencia, podemos descartar las fuentes variables.

Por otra parte, y puesto que buscamos subhalos tan pequeños que no contienen gas ni estrellas, podemos desestimar también aquellas fuentes que tienen asociadas emisiones en otras longitudes de onda. Aunque el origen último de tales emisiones siga sin comprenderse y, por tanto, la fuente siga considerándose como no identificada desde el punto de vista astrofísico, lo que sí sabemos es que no puede tratarse de un subhalo compuesto únicamente por materia oscura.

Además de estos filtros, es posible aplicar otros a partir de las propiedades esperadas de una señal de aniquilación de WIMP. Gracias a ello, el año pasado nuestro grupo de investigación halló que el número de fuentes gamma candidatas a constituir subhalos de materia oscura podía reducirse a unas 40.

Llegados a este punto, el filtrado puede depurarse aún más. En el modelo WIMP es posible predecir el espectro de la señal; es decir, cuántos fotones gamma esperamos observar en función de su energía. Y, para mayor gloria, este espectro resulta ser único para cada tipo de fuente en el universo, lo que nos proporciona una especie de «huella dactilar» para identificar los candidatos. En un caso ideal, comparar el espectro observado con el predicho para las aniquilaciones de WIMP debería bastar. En la práctica, sin embargo, los datos distan mucho de ser tan precisos, pues tratamos con fuentes típicamente muy débiles, en el límite de detección de Fermi-LAT, y como consecuencia la reconstrucción de sus espectros viene acompañada de grandes incertidumbres experimentales. Pese a todo, en otro trabajo publicado también el año pasado, nuestro grupo consiguió rebajar el número de candidatos de 40 a tan solo 7.

Por último, otra característica de gran interés es la extensión espacial del flujo de luz que vemos. La gran mayoría de las fuentes gamma aparecen como puntuales para Fermi-LAT; es decir, ocupan un tamaño menor que la resolución angular del telescopio, la cual es de unos 0,1 grados. Este aspecto puntual se debe a que suele tratarse de fuentes extragalácticas y, por tanto, muy lejanas. Por el contrario, las pocas fuentes que aparecen como extensas se encuentran a la altura del plano de la Vía Láctea, lo que sugiere que muy probablemente se trate de fuentes de nuestra propia galaxia, relativamente cercanas.

Dado que las fuentes candidatas a corresponder a subhalos galácticos no tienen asociada ninguna emisión en otras longitudes de onda, resulta imposible estimar la distancia a la que se encuentran. Sin embargo, lo que sí podemos hacer es calcular el tamaño angular típico que deberían presentar estos subhalos según se verían desde la Tierra. Mediante simulaciones cosmológicas, nuestro grupo ha hallado que los subhalos más brillantes del cielo deberían tener tamaños angulares de en torno a los 10 grados; es decir, muy por encima de la resolución angular de Fermi. Eso entra en contradicción con los datos de los que disponemos en la actualidad, ya que todas las fuentes prometedoras resultan ser puntuales. Con todo, esto no elimina la posibilidad de que alguna de ellas corresponda a un subhalo galáctico, ya que una fuente extensa podría aparecer como puntual si, entre otras características, su señal es débil y se halla por tanto en el límite de detección del telescopio.

CERCO AL MODELO WIMP

Así pues, con los datos disponibles hoy en día, ninguna de las fuentes de rayos gamma no identificadas puede asociarse de manera concluyente a un subhalo de materia oscura. Pero, lejos

OBSERVACIONES

Propiedades excluidas

Las hipotéticas partículas de materia oscura pueden caracterizarse por su masa y por la intensidad con que interaccionan, dos parámetros hasta ahora desconocidos. Al comparar las características de las fuentes de rayos gamma observadas por los telescopios con la señal que cabría detectar debido a aniquilaciones de WIMP, los físicos pueden imponer cotas a las propiedades de estas partículas.

Esta gráfica muestra, para cada valor posible de la masa de las WIMP (*eje horizontal*), qué límites a la intensidad de la interacción (*eje vertical*) imponen distintas observaciones astronómicas. Las zonas sombreadas están excluidas por los datos.

ADAPTADO DE: «SPECTRAL AND SPATIAL ANALYSIS OF THE DARK MATTER SUBHALO CANDIDATES AMONG FERMI LARGE AREA TELESCOPE UNIDENTIFIED SOURCES», POR JAVIER CORONADO-BLÁZQUEZ ET AL. EN *JOURNAL OF COSMOLOGY AND ASTROPARTICLE PHYSICS*, VOL. 2019, NOVIEMBRE DE 2019

de ser un resultado inútil, estas observaciones nos permiten restringir de forma significativa las propiedades de las WIMP, un ejercicio que constituye un aspecto importante de toda búsqueda infructuosa en ciencia.

Para ello, hemos de comparar las predicciones de nuestros modelos para la población de subhalos galácticos con los datos obtenidos por Fermi-LAT. Recordemos que las simulaciones predicen millones de estos subhalos, mientras que Fermi LAT solo observa, como mucho, un puñado de candidatos. Por tanto, si estos realmente corresponden a subhalos de materia oscura, deberán ser los más brillantes de todos los predichos por las simulaciones. Por ejemplo, si suponemos que tenemos 100 candidatos entre las fuentes no identificadas por Fermi, y que todos ellos son subhalos, estos deben ser los 100 más brillantes predichos por la simulación. De igual modo, si solo contamos con 10 candidatos, estos deberían ser los 10 más brillantes. De esta manera, cuantos menos candidatos tengamos, más brillantes deberán ser sus homólogos teóricos y más restrictivas serán las cotas que podremos imponer a las propiedades de las WIMP.

Para restringir las propiedades de estas partículas a partir de las observaciones, resulta necesario caracterizar con detalle la sensibilidad de nuestro instrumento a una posible señal de materia oscura. Esto es importante, ya que la sensibilidad de los telescopios de rayos gamma está calculada para fuentes astrofísicas tradicionales, mientras que las posibles señales de materia oscura presentan un espectro muy distinto. Una vez obtenida esta sensibilidad para un amplio abanico de modelos teóricos de WIMP, y combinándola con el resultado de nuestra búsqueda de subhalos en los catálogos de Fermi-LAT, resulta posible acotar las características de estas partículas hasta un nivel muy similar al alcanzado mediante el estudio de las galaxias satélite de la Vía Láctea, consideradas hasta ahora los mejores objetos para la búsqueda indirecta de materia oscura.

El hecho de que los límites impuestos al modelo WIMP a partir de las observaciones de galaxias satélite y la búsqueda de subhalos arrojen resultados tan similares no deja de ser notable, ya que una y otra técnica son independientes y se basan en metodologías completamente distintas. Esto hace que ambos enfoques se perciban como perfectamente complementarios, y sus resultados, más fiables aún.

EL FUTURO DE LAS BÚSQUEDAS INDIRECTAS

Hoy por hoy seguimos sin conocer la naturaleza última de la materia oscura. Pero no cabe duda de que, desde que comenzamos su búsqueda, hemos conseguido expandir considerablemente nuestro conocimiento acerca de lo que *no* es. Esta conclusión puede parecer derrotista, pero no lo es en absoluto, ya que ha sido posible gracias a una sinergia antaño inimaginable entre campos de investigación muy dispares. Hoy, las búsquedas indirectas de materia oscura constituyen un precioso ejemplo de esfuerzo conjunto entre la física de partículas, la cosmología, la astrofísica de altas energías y las simulaciones por ordenador. Esta combinación ha resultado ser extremadamente fructífera para todas las disciplinas implicadas.

A estas alturas, lo que podemos asegurar es que la materia oscura es mucho más esquiva de lo que nadie pensó en un principio, por lo que solo una combinación de diferentes técnicas y campos de investigación dará con la solución a su misterio. En el caso de objetos tan peculiares como los subhalos, parece evidente que la astrofísica tradicional —la misma disciplina que aportó las primeras pruebas de la existencia de la materia oscura— no será suficiente.

El impacto científico de estas búsquedas es difícil de sobreestimar. No en vano, han sido siempre un incentivo de primer orden para todos los instrumentos de rayos gamma pasados y actuales, y constituyen una parte esencial de los objetivos científicos de los futuros observatorios de rayos gamma, como el proyecto CTA. Esta futura red de telescopios conseguirá una resolución y sensibilidad sin precedentes, lo que le permitirá cartografiar el universo violento como nunca antes. Ello permitirá seguir estudiando la naturaleza última de la materia oscura, quién sabe si encumbrando o arrinconando definitivamente el escenario WIMP y sus «milagros».

Por último, semejante búsqueda reviste interés desde el punto científico por una doble razón. Si detectamos WIMP, habremos resuelto el misterio de la materia oscura y podremos confirmar nuestra visión actual acerca de la evolución del universo. En caso contrario, quedará en jaque el que ha sido el marco de referencia de la cosmología en las últimas décadas, lo que obligará a considerar nueva física, más exótica si cabe que la que dio lugar al escenario WIMP. Lo único claro por ahora es que, como tantas otras veces en la historia de la ciencia, el universo nos da una lección de humildad y nos reta a comprender lo incomprensible. IyC

PARA SABER MÁS

Earth-mass dark-matter haloes as the first structures in the early universe. Juerg Diemand, Ben Moore y Joachim Stadel en *Nature*, vol. 433, págs. 389–391, enero de 2005.

Searching for dark matter annihilation from Milky Way dwarf spheroidal galaxies with six years of Fermi-LAT data. Colaboración Fermi-LAT en *Physical Review Letters*, vol. 115, art. 231301, noviembre de 2015.

Characterization of subhalo structural properties and implications for dark matter annihilation signals. Ángeles Moliné et al. en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 466, págs. 4974–4990, mayo de 2017.

The Fermi galactic center GeV excess and implications for dark matter. Colaboración Fermi-LAT en *The Astrophysical Journal*, vol. 840, mayo de 2017.

Unidentified gamma-ray sources as targets for indirect dark matter detection with the Fermi-Large Area Telescope. Javier Coronado-Blázquez et al. en *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 2019, julio de 2019.

Spectral and spatial analysis of the dark matter subhalo candidates among Fermi Large Area Telescope unidentified sources. Javier Coronado-Blázquez et al. en *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 2019, noviembre de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Mundos oscuros. Jonathan Feng y Mark Trodden en *IyC*, enero de 2011.

El estado actual de la búsqueda de materia oscura. Alejandro Ibarra en *IyC*, junio de 2014.

Materia oscura compleja. Bogdan A. Dobrescu y Don Lincoln en *IyC*, 2015.

por Jesús Bautista-Rodríguez, José María Gil-Sánchez y Ginés Jesús Gómez

Rivalidad entre aves rapaces

En Andalucía, el águila real se está imponiendo sobre la perdicera como consecuencia, paradójicamente, de las medidas de protección

Los programas de conservación de especies amenazadas suelen estar diseñados para resolver los problemas que las afectan, la mayoría de las veces derivados de las actividades humanas. Pero a menudo la funcionalidad de dichas especies en los ecosistemas no se conoce tan bien como los problemas que se pretenden corregir. Como consecuencia, las intervenciones destinadas a recuperarlas y protegerlas pueden acarrear efectos imprevistos en otros taxones.

Un ejemplo ilustrativo de este fenómeno lo ofrecen los programas de conservación en Andalucía del águila imperial ibérica (*Aquila adalberti*) y el águila-azor perdicera (*Aquila fasciata*), las dos clasificadas como especies vulnerables a la extinción. Dichos programas, dirigidos por la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía, están destinados a mejorar la supervivencia de estas aves principalmente mediante el control del uso ilegal de cebos envenenados (búsqueda y retirada del cebo con la ayuda



LAS CORDILLERAS BÉTICAS ANDALUZAS son el escenario de la competencia entre el águila real (*derecha*) y el águila-azor perdicera (*izquierda*). Los programas de conservación llevados a cabo entre 1998 y 2020 están permitiendo la expansión del águila real desde sus refugios de montaña hacia zonas rurales, previamente ocupadas por la perdicera.

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

de equipos caninos; programas de concienciación del colectivo cinegético, etcétera) y la corrección de tendidos eléctricos (protección con material aislante de los postes y de los cables para evitar la electrocución de las aves).

Estas actuaciones, que se iniciaron en 2002, han dado sus frutos, pero también han beneficiado a otras especies menos amenazadas, entre ellas el águila real (*Aquila chrysaetos*). Paradójicamente, su mayor supervivencia ha perjudicado al águila-azor perdicera. Durante un período de estudio de 26 años (1994-2020), la Asociación Wilder South, encargada de gran parte del seguimiento de las poblaciones de águila real y águila-azor perdicera en las Cordilleras Béticas, ha observado que han desaparecido o han sido desplazadas más del 10 por ciento de las parejas reproductoras de perdicera de la población bética andaluza, mientras que las de águila real han aumentado más del 60 por ciento, con 86 nuevas parejas.

Las dos rapaces constituyen un buen ejemplo de especies potencialmente competidoras. En la región mediterránea, los requerimientos ecológicos de ambas pueden solaparse en gran medida, sobre todo el hábitat de nidificación (básicamente, los cortados rocosos) y, en parte, la alimentación. Si estos recursos escasean, se produce una competencia entre las dos especies, en la que el águila real, de mayor tamaño, tiene una posición ventajosa. Hemos observado agresiones y depredación de esta sobre la perdicera, así como la usurpación de sus nidos para criar. Otro factor que favorece la instalación de nuevas parejas de águila real es el abandono humano de las zonas rurales. La beneficia especialmente a ella porque la perdicera, mucho más tolerante a la presencia humana, ya ocupaba esas zonas.

Nuestras observaciones alientan a seguir estudiando la aparición de competencia derivada de la conservación, muy pocas veces documentada en este ámbito. Es imprescindible seguir de cerca la relación entre las dos águilas para poder adaptar las futuras actuaciones.

Jesús Bautista-Rodríguez, José María Gil-Sánchez
y Ginés Jesús Gómez
Asociación Wilder South



MANUEL OTERO PÉREZ (*águila real y águila-azor perdicera*), JESÚS BAUTISTA (*cordilleras béticas*)

por Esteban Moreno Gómez



Esteban Moreno Gómez, geólogo, se dedica al estudio y conservación de la instrumentación científica de interés histórico del CSIC. Participa también en el programa «El CSIC en la escuela».

El color azul del mar

Dorotea Barnés y la introducción de la espectroscopía Raman en España

Uno de los privilegios de conservar y estudiar el abundante patrimonio instrumental del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) es que nos permite indagar en la historia de nuestra ciencia desde la óptica de los referentes materiales que constituyen los antiguos aparatos científicos. A modo de ejemplo, quisiera hablarles de un espectrógrafo, protagonista mudo de innumerables experimentos, con el que podremos conocer un apasionante descubrimiento de la ciencia, la dispersión Raman; la técnica a la que dio lugar, la espectroscopía Raman y a Dorotea Barnés, la investigadora que la introdujo en nuestro país.

Conservado en el despacho de dirección del Instituto de Química Física Rocasolano (IQFR) del CSIC, se encuentra un sencillo y preciso instrumento que fue empleado por dos grandes de la ciencia española: Miguel Antonio Catalán Sañudo y Dorotea Barnés González. Se trata de un espectrógrafo de cuarzo, de pequeñas dimensiones, utilizado para analizar la luz que emite o absorbe la sustancia que se quiere estudiar. Este aparato, que tiene un siglo de antigüedad, procede del Laboratorio de Investigaciones Físicas (LIF), que, fundado en 1910, fue el principal centro español de investigación en física y química a principios del siglo xx. El LIF, dirigido por Blas Cabrera, fue uno de los primeros laboratorios adscritos a la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas (JAE) y la cuna experimental de los principales investigadores protagonistas de la denominada «Edad de Plata» de la ciencia española.



ESPECTRÓGRAFO DE CUARZO conservado en el Instituto de Química Física Rocasolano del CSIC.

CORTESÍA DEL AUTOR

El espectrógrafo, construido por la firma inglesa Adam Hilger, se encontraba entre los instrumentos más apreciados de la época debido a la calidad óptica de sus lentes y del prisma doble que poseía. Su funcionamiento es sencillo: la luz que emite, o atraviesa, la muestra es dirigida al interior del espectrógrafo, donde un prisma la dispersa, separándola en sus distintas frecuencias; se genera así un espectro (formado por líneas o bandas de distinto color e intensidad) que puede ser registrado en placas fotográficas. Desde el siglo xix, multitud de sustancias, así como la luz de numerosas estrellas, se venían estudiando con este tipo de instrumentos.

En el primer tercio del siglo xx, el científico español más destacado en el campo de la espectroscopía fue, sin duda, Miguel Antonio Catalán (1894-1957). Sus estudios sobre los complejos espectros que se obtenían al excitar electrónicamente distintos metales de transición (magnesio, molibdeno, plata, etcétera) le llevaron a descubrir una serie de líneas espectrales, los multipletes, que fueron determinantes para apuntalar experimentalmente el modelo atómico propuesto por el físico alemán Arnold Sommerfeld. A la relevancia científica de Catalán se suma su papel como creador de una escuela de espectroscopistas que tuvo como sede el entonces recién creado Instituto Nacional de Física y Química (INFQ), sucesor del LIF y actual IQFR. El cincuenta por ciento del personal investigador de la sección de espectroscopía eran mujeres. Y entre ellas se encontraba Barnés.

El descubrimiento de Raman

En 1921, un año después de que Catalán descubriera los multipletes, el físico hindú Chandrasekhara Venkata Raman visitaba Oxford para impartir una serie de conferencias. Recibido por J. J. Thomson y Ernest Rutherford, ambos premios nóbel,

Raman era ya un científico de renombre por sus estudios sobre acústica aplicados a diversos instrumentos musicales. En su viaje de regreso a la India, Raman se percató del color azul intenso que mostraba el mar Mediterráneo y no le convenció la explicación, aceptada por entonces, que achacaba el color del mar al reflejo, en el agua, del azul con el que se mostraba el cielo. Dos años antes de la visita de Raman a Inglaterra, había fallecido otro nóbel, Lord Rayleigh, quien en 1871 había explicado el color azul del cielo como un fenómeno de dispersión de la luz del sol por las moléculas presentes en la atmósfera.

Tras su regreso a la India, Raman —con el azul del Mediterráneo en su cabeza— inició una serie de experimentos encaminados a investigar más a fondo los fenómenos de dispersión en distintos líquidos. En los primeros años de su estudio, el material de laboratorio era bastante rudimentario y el montaje experimental muy sencillo: tras filtrar la luz solar hacían pasar un haz de luz violeta por distintos líquidos que lo dispersaban en luz mayoritariamente violeta, tal y como preveía la teoría de Rayleigh. Pero, tras filtrar este espectro, descubrió que una mínima parte de la luz dispersada no tenía el mismo color (frecuencia) que la luz incidente. Esto le llevó a proponer que el color del mar se debía a la dispersión de la luz por las moléculas del agua mediante un nuevo tipo de dispersión que generaba luz de distinto color a la inicialmente utilizada. Para 1928, Raman pudo disponer de un mejor equipamiento: una lámpara de arco de mercurio como fuente de luz y un espectrógrafo, idéntico al conservado en el CSIC, con el que pudo fotografiar el espectro de distintas sustancias mediante esta nueva técnica. Por el descubrimiento de este nuevo mecanismo de dispersión, conocido como efecto Raman, se le concedió el premio Nobel de física en 1930.

El efecto Raman implicaba una nueva interacción entre la radiación (luz) y la materia, y ello tuvo consecuencias inmediatas en el desarrollo de la, por entonces, incipiente teoría cuántica. Al mismo tiempo, resultó ser una poderosa herramienta para el análisis y la caracterización de sustancias químicas, lo que nos lleva a nuestra siguiente protagonista.

Dorotea Barnés y la espectroscopía Raman

La década de 1930 comenzó con buenas noticias para la ciencia española. Gracias a la cuantiosa donación de la Fundación Rockefeller se pudo construir e inaugurar el edificio del INFQ, «el Rockefeller», en cuya Sección de Espectroscopía acabó nuestro espectrógrafo y donde se propusieron iniciar investigaciones basadas en el efecto Raman. Debido a sus habilidades como experimentadora, fue Barnés la encargada de preparar el instrumental necesario para la nueva técnica.

Para hacernos una idea de sus excepcionales cualidades como experimentadora tengamos en cuenta que, mientras estudiaba la carrera de química, Barnés realizó varios cursos en el Laboratorio Foster de la Residencia de Señoritas. Tras obtener la licenciatura, fue becada por la JAE y el Colegio Smith de Northampton, donde a sus dotes como química experimental sumó el manejo de equipamiento para el análisis espectral. Su estancia en Norteamérica se prolongó otro año gracias a una beca para trabajar en el departamento de química de la Universidad Yale.

A su regreso a España, Catalán le propone la puesta en marcha de la técnica Raman en el INFQ. En aquella época, la espectroscopía Raman requería de un laborioso montaje. La sustancia que se quería estudiar debía ser lo más pura posible, por lo que se requería a alguien que, como Barnés, tuviera hábiles dotes en la purificación y preparación de muestras. Para ampliar sus conocimientos en cuanto al montaje experimental necesario para esta técnica, Barnés viajó a Graz. Allí trabajó con el físico Fritz Kohlrausch, quien se había convertido en uno de los primeros expertos europeos en la nueva técnica.

En el laboratorio de Kohlrausch, Barnes aprendió y ensayó la técnica Raman. Además de nuevos métodos de preparación de diversos hidrocarburos, se ejercitó en el uso de filtros químicos como el quinosol; en las lámparas para la correcta iluminación; en los dispositivos encargados de la refrigeración de la muestra; en las distintas técnicas para fotografiar el espectro resultante y en los diversos modelos para interpretar los resultados. De esta manera, Barnés se convirtió en la primera especialista en espectroscopía Raman de nuestro país. En 1932 publicó, junto con Kohlrausch, un artículo acerca de los niveles de vibración de los enlaces entre los átomos de diversos hidrocarburos estudiados mediante esta técnica. Durante los siguientes años, continuó con el uso de la espectroscopía Raman analizando los espectros de diversas sustancias, especialmente alcoholes. Desgraciadamente, situaciones personales y la Guerra Civil truncaron la trayectoria de esta gran investigadora, quien ya había obtenido la cátedra de física y química en un Instituto de Madrid.

En sus diversas variantes, la espectroscopía Raman tiene, en la actualidad, múltiples aplicaciones en distintos campos del saber: en química y farmacia, para identificar moléculas, sus variantes y sus enlaces; en física del estado sólido, para caracterizar materiales; en medicina, para evaluar de forma no invasiva la evolución en la curación de una herida, y en historia, para analizar pinturas, textiles y otros restos arqueológicos.

Con este espectrógrafo, durante mucho tiempo olvidado, Barnés realizó numerosas fotografías y mediciones de los espectros de diferentes sustancias, contribuyendo a su identificación y al conocimiento de su estructura química. El mismo modelo de aparato, con el que Raman realizó su descubrimiento, es conservado y expuesto en la Asociación India para el Cultivo de Ciencias en Calcuta.

El estudio de los instrumentos científicos nos permite completar, aportando diferentes facetas, el conocimiento de la historia de la ciencia. La conservación de este patrimonio, de esta cultura material de nuestros laboratorios, debería promoverse desde todas las administraciones. IyC

PARA SABER MÁS

Miguel Catalán. Su obra y su mundo. José Manuel Sánchez Ron. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1994.

The Raman effect. An international historic Chemical landmark. American Chemical Society/Indian Association for the Cultivation of Science, 1998.

Pioneras españolas en las ciencias. Las mujeres del Instituto Nacional de Física y Química. Carmen Magallón Portolés. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2004.

Instrumentos de la ciencia española: Los aparatos históricos del CSIC. Esteban Moreno Gómez. Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Los libros de la Catarata, 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las jóvenes científicas del «Rockefeller» (1931-1939). Carmen Magallón en IyC, junio de 2018.

por Naomi Oreskes

Naomi Oreskes es profesora de historia de la ciencia en la Universidad Harvard. Es autora de *Why trust science?* (Princeton University Press, 2019) y coautora de *Discerning experts* (University of Chicago Press, 2019).



El sexismo y el racismo persisten en la ciencia

Nos engañamos si creemos que el sistema se corregirá mágicamente a sí mismo

En ciencia, los ánimos están caldeados porque se ha iniciado un debate, largo tiempo esperado, sobre cómo se trata a las mujeres y a las personas de razas minoritarias. En junio, miles de investigadores y académicos de todo el mundo, además de las destacadas publicaciones *Science* y *Nature*, dejaron de trabajar durante un día para protestar contra el racismo existente en sus ámbitos. La Sociedad Estadounidense de Física apoyó la iniciativa y mostró su compromiso con «la erradicación del racismo y la discriminación sistémicos» en la ciencia.

Un buen ejemplo de esta exclusión lo encontramos en la física. Los afroamericanos suponen un 14 por ciento de la población estadounidense en edad universitaria, una proporción similar a la que representan en la población total del país, pero, en física, obtienen entre un 3 y un 4 por ciento de títulos universitarios, menos de un 3 por ciento de doctorados, y en 2012 suponían solo el 2 por ciento del profesorado. Sin duda, hay muchas razones que explican esta baja representación, pero un factor preocupante es el rechazo de algunos científicos a reconocer, al menos, que existe este problema. La ciencia, defienden, es inherentemente racional y se corrige a sí misma.

Ojalá fuera cierto. La historia de la ciencia está plagada de casos bien documentados de misoginia, prejuicios y sesgos. Durante siglos, los biólogos fomentaron falsas teorías sobre la inferioridad de las mujeres, y las instituciones científicas prohibieron su participación en ellas. La historiadora de la ciencia Margaret Rossiter ha documentado cómo, a mediados del siglo xix, las investigadoras crearon sus propias sociedades científicas para compensar el rechazo de sus colegas varones a reconocer su trabajo. Sharon Bertsch McGrayne llenó un volumen entero con las historias de mujeres que deberían haber recibido el premio Nobel por un trabajo que hicieron en



colaboración con colegas varones —o, peor, que se lo robaron—. (Un ejemplo bien documentado es el de Rosalind Franklin: uno de los hombres que luego ganó el premio Nobel por esclarecer la estructura de doble hélice, utilizó, sin permiso, las fotografías que hizo ella de la estructura del ADN.) El sesgo racial ha sido igual de pernicioso, al menos, que el sesgo de género; después de todo, fueron los científicos quienes crearon el concepto de raza como una categoría biológica que no era simplemente descriptiva, sino jerárquica.

Los buenos científicos están abiertos a las ideas opuestas; se enfrentan a datos desafiantes y escuchan opiniones contrarias a las suyas. Pero también son humanos, y la ciencia cognitiva muestra que somos proclives al sesgo, a la percepción equivocada, al razonamiento motivado y a otros obstáculos intelectuales. Dado que el proceso de razonamiento es lento y difícil, nos basamos en la heurística, es decir, utilizamos atajos intelectuales que a menudo funcionan pero que en otras ocasiones fallan de manera espectacular. (Un ejemplo cansino es la creencia de que los hombres son, por norma general, mejores que las mujeres en matemáticas.) No es creíble proclamar que los científicos son de alguna forma inmunes a los sesgos que afectan a toda la sociedad.

Afortunadamente, la objetividad del conocimiento científico no depende de la objetividad de los científicos. Más bien depende de estrategias para identificar, reconocer y corregir sesgos y errores. Tal como he señalado en mi libro *Why trust science?*, el conocimiento científico empieza con afirmaciones defendidas por investigadores, equipos o laboratorios que luego son escrutadas por otros, quienes aportarán pruebas adicionales que las respalden —o las modifiquen o incluso rechacen—. Lo que acaba aceptándose como hecho científico o teoría rara vez es lo mismo que inició el camino; ha ido ajustándose a la luz de las pruebas y los argumentos. La ciencia es un esfuerzo colectivo, y cuando mejor funciona es cuando las comunidades científicas son diversas. La razón es muy sencilla: las comunidades heterogéneas tienen más probabilidades que las homogéneas de identificar los puntos flacos y corregirlos. La ciencia no se corrige a sí misma; los científicos se corrigen unos a otros mediante un interrogatorio crítico. Y eso significa estar dispuesto a investigar, además de las afirmaciones sobre el mundo exterior, las que tienen que ver con nuestras prácticas y procesos.

La ciencia ha logrado desentrañar una gran cantidad de conocimientos sobre el mundo natural y social, pero no ha hecho los mismo con sus propias debilidades. Y no las podemos corregir si seguimos creyendo que el sistema lo hará por sí solo por arte de magia. Reconocer la existencia de sesgos en ciencia y enfrentarse a ellos no es cuestión de ideología; en cambio, sí lo es insistir en que la ciencia no puede ser sesgada a pesar de las pruebas que demuestran lo contrario. Dado que desde hace tiempo sabemos que nuestros intentos de inclusión han fracasado, ya es hora de que finalmente los resolvamos.

ILUSTRACIÓN DE JAY BENDT

por Pere Castells y Claudi Mans

Claudi Mans es catedrático emérito de ingeniería química de la Universidad de Barcelona y divulgador científico.

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es presidente del congreso mundial Science&Cooking.

El lado dulce de la vida

Un paseo por el mundo de los edulcorantes

Con «asúcarrr» comienza la famosa canción de Celia Cruz *Ríe y llora*. Toda una declaración de intenciones que nos conecta con la calidez, el sabor y la alegría que solemos asociar a este producto.

Azúcar es el nombre habitual que se da a la sacarosa, el endulzante más común y patrón del gusto básico dulce. *Endulzante* sería la palabra común para referirse a productos que confieren sabor dulce. En las cocinas y la industria alimentaria, en cambio, hablan de *edulcorante*. Y cuando un médico dice a un diabético que «tiene azúcar» en la sangre y que, por tanto, no tome azúcar en su dieta, usa el mismo término en dos acepciones distintas. En el primer caso se refiere a la glucosa; en el segundo, a la sacarosa. Para el químico, un *azúcar* es un hidrato de carbono de cadena corta o de pocos átomos de carbono. Los más conocidos son la glucosa, de 6 átomos de carbono (C6), denominada en gastronomía dextrosa; la fructosa (C6), la lactosa (C12) y la ya mencionada sacarosa (C12).

Antoni Riera Melis, catedrático de la Universidad de Barcelona y experto en historia social y cultural de la alimentación, explica que el azúcar se obtuvo inicialmente de la caña de azúcar, que es originaria del sudeste asiático, Indonesia e India, y que durante el primer milenio antes de Cristo se expandió hasta China. En el siglo VIII, los musulmanes la introdujeron en el Magreb y Al-Ándalus, y, más tarde, en Sicilia. Su uso fue inicialmente farmacéutico y después culinario, aunque restringido a las clases altas. En el siglo XIII se difundió entre las clases populares gracias al aumento de su producción y a la reducción del precio. Sustituyó entonces a la miel en la cocina y la pastelería musulmana.

Actualmente, el azúcar de caña o de remolacha es el principal edulcorante mundial procedente de la agricultura. Se presenta en múltiples variantes: blanco, moreno, mascabado, panela, demerara o melaza. Todas corresponden a sacarosa más o menos purificada y tienen un valor energético de unas 4 kcal por gramo.



HELADO de *boletus edulis* a la brasa con humo de encina en burbuja de isomalt.

CORTESÍA DE JORDI ROCA, RESTAURANTE EL CELLER DE CAN ROCA

Sin embargo, la palabra *edulcorante* se asocia popularmente a otros productos fuera del ámbito de los hidratos de carbono y que se clasifican en dos tipos radicalmente distintos: los polioles, que aportan energía pero menos que el azúcar, y los intensivos, que son prácticamente acalóricos.

Los polioles que se aplican en gastronomía son el maltitol, el manitol y el isomalt. El maltitol es también un C12, pero de estructura química muy distinta a la de la sacarosa; se usa como sustituto directo del azúcar en productos «sin azúcar», como el chocolate sin azúcar. El manitol es un C6 y cristaliza en una forma peculiar (de ahí que lo usaran en El Bulli para crear sus *cacahuetes miméticos*, cuya cáscara era simulada por la estructura crujiente del manitol). Pero el más utilizado es el isomalt, también un C12, que permite conseguir estructuras sólidas transparentes imposibles de obtener con la sacarosa, al coincidir el punto de fusión con el de caramelización. Jordi Roca aplica la técnica del soplado de vidrio al isomalt para obtener formas redondas. José Andrés presentó ya en el 2006 su gota de aceite de oliva caramelizada con isomalt, que se ha convertido en una elaboración icónica. El eritritol, último poliol en llegar (C4), es distinto: no presenta los efectos laxantes que sí se asocian a los anteriores a dosis elevadas y tiene prácticamente 0 calorías. Está sustituyendo la sacarosa en helados y pasteles.

A diferencia de los polioles, los edulcorantes intensivos aportan dulzor, pero no textura. Ello impide que puedan ser sustitutos directos de la sacarosa y, por tanto, prácticamente no se utilizan en elaboraciones culinarias. La mayoría son sintéticos y suelen tener en su molécula átomos de nitrógeno o de azufre (además de carbono, hidrógeno y oxígeno).

Llega ahora el turno de un edulcorante muy popular: la sacarina. Fue descubierta accidentalmente por Constantin Fahlberg al impregnarse de residuos sus manos y encontrar dulce la carne que comió para cenar. Al día siguiente comprobó que el sabor dulce era debido a la sustancia con la que estaba trabajando. Junto con su jefe, Ira Remsen, Fahlberg describió la síntesis de la sacarina en 1879 en *American Chemical Journal*. Con el nombre genérico de sacarina encontramos también acesulfame K, aspartame, ciclamato, neohesperidina-DC, sucralosa o la poco utilizada taumatina, todos ellos considerados acalóricos. Todos son sintéticos excepto la taumatina, una proteína natural catalogada como el producto más dulce del mundo (2500 veces más que la sacarosa).

Otro edulcorante intensivo que se ha popularizado es el glucósido de esteviol, conocido como estevia, por el nombre de la planta de la cual se extrae [*véase* «Entre planta y edulcorante», por Pere Castells; Investigación y Ciencia, marzo de 2013]. Y la búsqueda de nuevos edulcorantes continua. Ya se está hablando —y mucho—, del *monk fruit* o fruto de Buda, originario del sudeste asiático. Es un fruto pequeño con piel parecida al melón y del cual se extrae un producto 100 veces más dulce que la sacarosa. Un mar de posibilidades para endulzarse la vida.



ETOLOGÍA

EL DISTANCIAMIENTO SOCIAL EN LOS ANIMALES

Langostas, aves y algunos primates utilizan con frecuencia el distanciamiento social para evitar el contagio, una conducta que a nosotros nos cuesta poner en práctica

Dana M. Hawley y Julia C. Buck

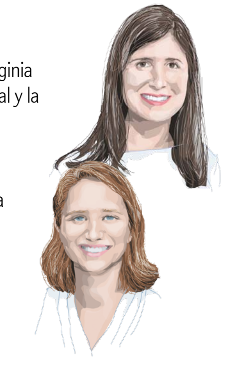
Ilustración de Nick Kilner

EN SÍNTESIS

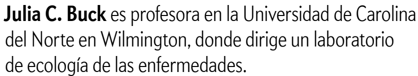
A pesar de lo antinatural que nos pueda parecer el distanciamiento social, este forma parte del mundo natural y lo practican mamíferos, peces, insectos y aves.

Los animales sociales se alejan y modifican los comportamientos, como el acicalamiento, para detener la propagación de enfermedades que podrían causarles la muerte.

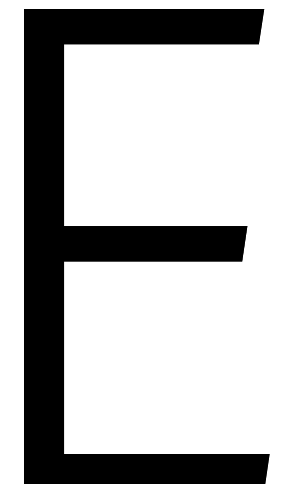
Las estrategias van desde evitar al animal enfermo hasta mantener interacciones solo con los parientes más cercanos.



Dana M. Hawley, catedrática de Virginia Tech, estudia el comportamiento social y la enfermedad en los animales.



Julia C. Buck es profesora en la Universidad de Carolina del Norte en Wilmington, donde dirige un laboratorio de ecología de las enfermedades.



En un arrecife poco profundo de los cayos de Florida, una joven langosta espinosa regresa después de pasar toda la noche buscando apetitosos moluscos y entra en su estrecha madriguera. Las langostas suelen compartir grietas rocosas, y esta noche ha entrado una nueva inquilina. No obstante, hay algo de la recién llegada que no pinta bien. Su orina huele diferente. Contiene sustancias que las langostas segregan cuando se han infectado con un virus contagioso llamado virus 1 de *Panulirus argus* (PaV1), y ello pone en alerta a la langosta que acaba de regresar de su ronda nocturna. A pesar de lo difícil que es dar con una madriguera como esta, tan bien protegida de los depredadores, el joven animal se da la vuelta y se marcha a aguas abiertas alejándose del virus mortal.

La respuesta de la langosta a la enfermedad, observada tanto en experimentos de campo como en el laboratorio, nos resulta muy conocida entre los humanos este año: el distanciamiento social. Hemos suprimido los contactos estrechos con la familia y los amigos para reducir la propagación de la COVID-19. Está siendo muy duro. Y muchos cuestionan su necesidad. Sin embargo, aunque nos parezca algo antinatural, el distanciamiento social se practica en la naturaleza. Además de las langostas, especies tan diferentes como monos, peces, insectos y aves detectan y se alejan de sus semejantes enfermos.

Este tipo de comportamiento está extendido porque contribuye a la supervivencia de los animales sociales. Aunque el hecho de vivir en grupo les hace más fácil capturar presas, permanecer calientes y evitar a los depredadores, también favorece la propagación de las enfermedades contagiosas. (Pregúnteselo, por ejemplo, a cualquier persona con algún hijo en la guardería.) El aumento de este riesgo ha promovido la evolución de comportamientos que ayudan a evitar la infección. Los animales que se alejan socialmente durante un brote son los que tienen más probabilidades de seguir con vida. Eso, a su vez, incrementa sus posibilidades de tener descendientes, que también practicarán el distanciamiento social cuando se enfrenten a una enfermedad. Tales acciones son lo que en ecología de enfermedades llamamos «inmunidad por comportamiento». Los animales silvestres no tienen vacunas, pero pueden evitar los contagios actuando de distintas formas.

No obstante, la inmunidad mediante el comportamiento también acarrea costes. El distanciamiento, aunque sea temporal, implica la pérdida de los numerosos beneficios que se derivan de un modo de vida social. Por esta razón, los investigadores han descubierto que la evitación es solo una de las diversas opciones por las que optan los animales. Algunas especies sociales permanecen juntas cuando los miembros se han infectado, pero, por ejemplo, modifican ciertas interacciones de acicalamiento; otras, como las hormigas, limitan los encuentros entre los individuos que desempeñan una función esencial en la colonia, todo ello para reducir el riesgo de infección.

EL SACRIFICIO VALE LA PENA

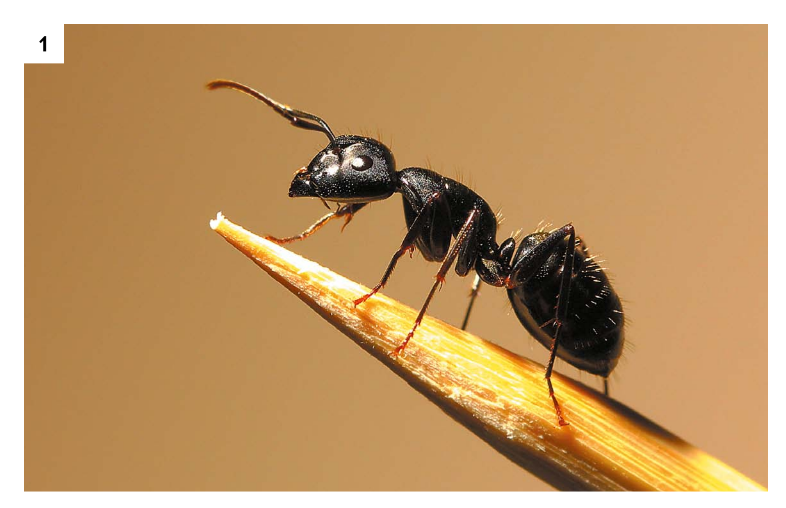
La capacidad de las langostas espinosas a la hora de detectar y evitar a los miembros del grupo que están infectados ha sido fundamental en su supervivencia frente a la amenaza del virus PaV1, que mata a más de la mitad de las langostas jóvenes que infecta. Estas son una elección fácil para el virus, ya que son muy sociales y, a veces, se resguardan en la misma madriguera en grupos de hasta veinte individuos. Los refugios seguros que suponen las esponjas, los corales o las grietas rocosas a lo largo del lecho oceánico, además de la gran concentración de pinzas mordedoras, ayudan al grupo a defenderse de depredadores hambrientos, como el pez ballesta. No obstante, a principios de la década de 2000, Don Behringer, de la Universidad de Florida, y sus colaboradores observaron que algunas langostas jóvenes se refugiaban solas, aunque eso las hiciera más vulnerables. Descubrieron que la mayoría de estas langostas solitarias estaban infectadas con el virus contagioso. Pero parecía que no habían elegido refugiarse solas, sino que las habían rechazado. Para confirmar esta suposición, colocaron diversas langostas en tanques de acuario y permitieron que otras que estaban sanas eligieran una madriguera artificial vacía o una ocupada por una langosta, que podía estar sana o enferma. En un artículo publicado en 2006 en *Nature*, los investigadores informaron de que, cuando ninguna estaba enferma, las langostas sanas preferían ser sociales y escogían madrigueras en las que ya había una congénere sana, en lugar de las vacías. En cambio, evitaban enérgicamente las madrigueras ocupadas por langostas infectadas con el virus, aunque eso significase que tuvieran que quedarse solas.

En un estudio posterior publicado en 2013 en *Marine Ecology Progress Series*, Behringer y su colaborador Joshua Anderson demostraron que las langostas sanas detectaban a las infectadas mediante el olfato. Resulta que la orina de las segundas presenta sustancias que sirven como señal de peligro para sus compañeras sanas. Cuando los científicos utilizaron pegamento instantáneo para anular los órganos que liberan la orina de las langostas infectadas, las que estaban sanas ya no las evitaban.

Cuando las langostas detectan una congénere enferma, están dispuestas a asumir riesgos importantes con tal de permanecer sanas. Mark Butler, de la Universidad de Old Dominion, y sus colaboradores ataron una langosta infectada en la madriguera ocupada por ejemplares sanos en los Cayos de Florida y observaron que, a menudo, estos abandonaban su hogar y preferían las aguas abiertas donde el riesgo de ser devorados era mucho mayor. Cuando el equipo repitió el experimento atando una langosta sana, no se produjo ningún éxodo masivo. En su investigación, publicada en 2015 en *PLOS One*, los científicos utilizaron métodos matemáticos para demostrar que la evitación, aunque no carece de costes, previene el contagio vírico que, de otra forma, asolaría las poblaciones de langostas.

PROTEGER LO VALIOSO Y VULNERABLE

Las langostas no son los únicos animales que han descubierto que los beneficios del distanciamiento social a veces superan los costes. De hecho, otras criaturas han desarrollado formas de aumentar los beneficios practicando un distanciamiento social estratégico, de tal modo que protegen a los más valiosos o vulnerables de su grupo. Los ejemplos más impresionantes los hallamos en los insectos sociales, donde los distintos miembros de una colonia desempeñan funciones específicas que afectan de modo diferente a la supervivencia de toda la colonia.





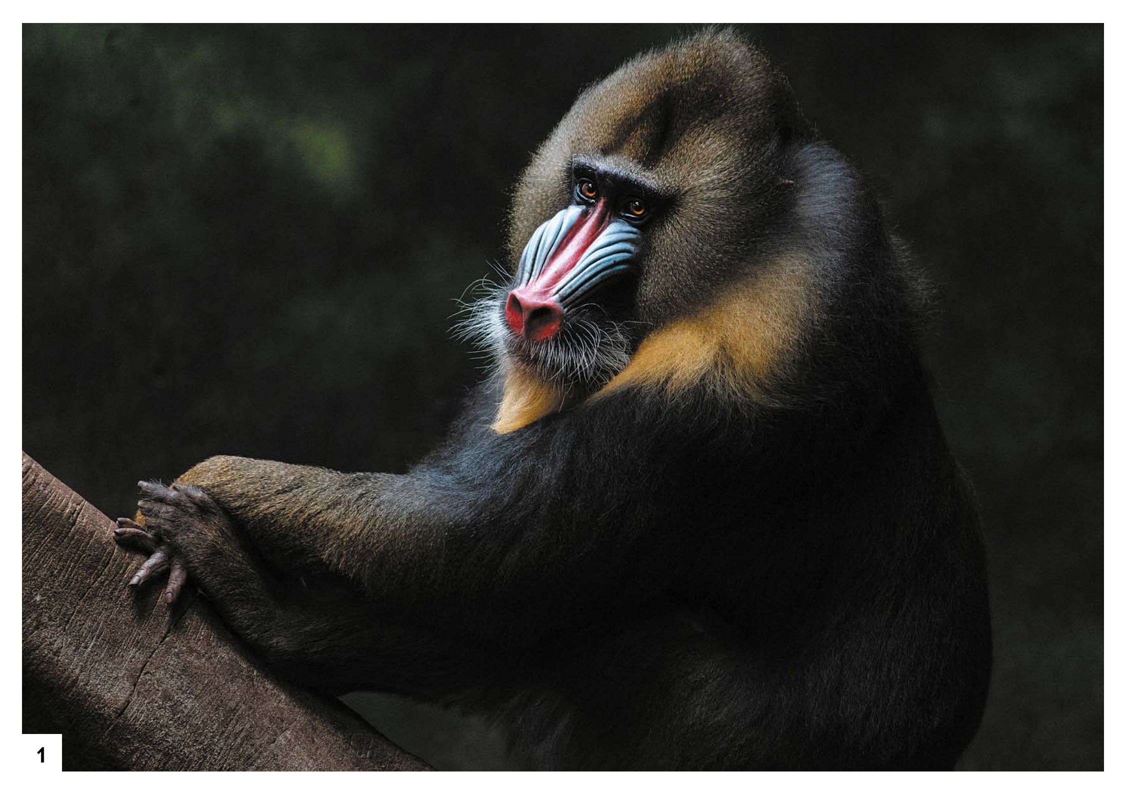
DISTANCIA ESTRATÉGICA: Las hormigas de jardín *(1)* se mantienen apartadas de su colonia cuando se han expuesto a un hongo. Los pinzones mexicanos *(2)* evitan a otros congéneres que parecen estar enfermos.

En un trabajo dirigido por Nathalie Stroeymeyt, de la Universidad de Bristol, y publicado en 2018 en *Science*, los investigadores utilizaron diminutas marcas con las que seguir los movimientos de colonias de hormigas de jardín (*Lasius niger*) durante un brote de un hongo letal, *Metarhizium brunneum*. Las esporas de este hongo pasan de una hormiga a otra a través del contacto físico; hacen falta de uno a dos días para que penetren en el cuerpo de la hormiga y la hagan enfermar, con consecuencias generalmente letales. El retraso entre la exposición y la enfermedad permitió ver al equipo de Stroeymeyt si las hormigas modificaban el comportamiento social durante las 24 horas posteriores al momento en el que detectaron las primeras esporas fúngicas en la colonia, pero antes de que las hormigas portadoras del hongo mostrasen signos de estar enfermas.

Para medir la respuesta de las hormigas cuando la enfermedad invade la colonia, los investigadores aplicaron esporas fúngicas directamente a un subconjunto de las hormigas forrajeras. Estas abandonan la colonia con regularidad y tienen más probabilidades de toparse inadvertidamente con esporas fúngicas mientras buscan alimento. Por consiguiente, este planteamiento imitaba lo que sucedería si el hongo se introdujera en la colonia de forma natural. Compararon el comportamiento de las hormigas de 11 colonias tratadas con el hongo con el mismo número de colonias de control, donde a las forrajeras se les untaba una solución estéril. Las hormigas de las colonias expuestas al hongo pusieron en marcha un distanciamiento social rápido y estratégico después del tratamiento. En 24 horas, esas hormigas forrajeras se aislaron y pasaron más tiempo lejos de la colonia, en comparación con las forrajeras del grupo de control.

Las hormigas sanas de las colonias tratadas con el hongo también redujeron enormemente el número de interacciones sociales, pero la forma en la que lo hicieron dependía de su papel en la colonia. Las forrajeras no infectadas, que interactuaban con frecuencia con otras forrajeras que sí podrían estarlo, se mantenían alejadas de la colonia cuando la enfermedad estaba presente. Esto evitaba que de modo inadvertido pusieran en riesgo a los miembros de la colonia reproductivamente valiosos (la reina y las «niñeras» que cuidan de las crías). Cuando el hongo era detectado en la colonia, las niñeras también tomaban medidas, trasladando a las crías a una zona más profunda del nido y lejos de las forrajeras. Las pistas que utilizan las hormigas para detectar con rapidez la presencia del hongo y responder con rapidez a él todavía nos son desconocidas, pero este distanciamiento social estratégico resultaba tan efectivo que todas las reinas y la mayoría de las niñeras de las colonias estudiadas seguían vivas cuando finalizaron los brotes experimentales.

ADITYA VISTARAKULA, GETTY IMAGES (1); GETTY IMAGES (2)





1

2

RIESGO RELATIVO: Los mandriles *(1)* acicalan a sus parientes cercanos incluso si estos tienen parásitos, pero evitan a otros miembros contagiosos del grupo. Las mangostas rayadas (*2*) dependen enormemente de la cooperación grupal, por lo que acicalan tanto a los animales enfermos como a los sanos de su grupo.

Las hormigas de jardín protegen a sus miembros más valiosos de la colonia, pero algunas aves utilizan una estrategia diferente, puede que guiadas por la fortaleza de sus propias respuestas inmunitarias y su resistencia a la infección. Maxine Zylberberg y sus colaboradores colocaron pinzones mexicanos en tres jaulas adyacentes. El pájaro situado en la jaula central estaba flanqueado, en un lado, por una jaula que contenía un pinzón sano, y en el otro, por otra jaula con un pinzón que parecía enfermo (había recibido una inyección que le hacía actuar de un modo letárgico). Al medir el tiempo que el pájaro del centro pasaba en cada lado de su jaula, los investigadores demostraron que solían evitar a los congéneres que parecían enfermos, aunque el grado de evitación variaba dependiendo de la fortaleza de su propio sistema inmunitario. Los pájaros con mayores concentraciones sanguíneas de anticuerpos y de otra proteína que puede desencadenar una activación inmunitaria más amplia exhibían menos aversión. Pero aquellos con niveles inferiores de inmunidad evitaban más a los enfermos. Los investigadores informaron de todo ello en *Biology Letters* en 2013.

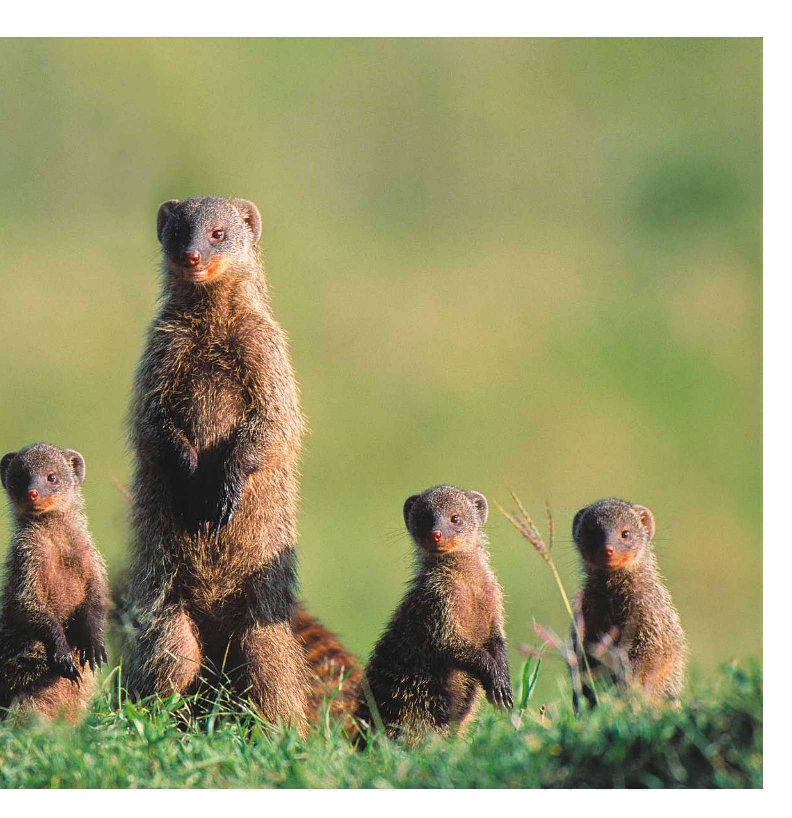
Un comportamiento similar se detectó en peces guppy infectados con un gusano contagioso y debilitante llamado *Gyrodactylus turnbulli*. En un trabajo publicado en 2019 en *Biology Letters*, Jessica Stephenson, de la Universidad de Pittsburgh, colocó peces no infectados en un acuario central que estaba flanqueado por otros dos tanques. Uno estaba vacío y el otro contenía un grupo con tres peces que representaban un potencial riesgo de contagio. Muchos preferían el lateral del tanque cerca de los demás peces, que era lo esperado para una especie social. Pero algunos machos evitaron dicho lateral, y estos peces más distantes mostraron más tarde ser altamente vulnerables a las infecciones con gusanos. Tiene sentido que la evolución favoreciera una mayor expresión del comportamiento de distanciamiento en aquellos individuos que tienen un mayor riesgo de enfermar.

LAZOS QUE UNEN

El distanciamiento social estratégico a veces significa mantener ciertos vínculos incluso cuando estos aumentan el riesgo de enfermar. Los mandriles, primates altamente sociales con coloridas caras, son un ejemplo de este enfoque. Esta especie puede encontrarse en grupos compuestos por decenas o incluso cientos de individuos en las selvas tropicales del África ecuatorial. Los grupos suelen estar formados por una mezcla de miembros de una familia extendida que se acicalan unos a otros con frecuencia; el acicalamiento mejora la higiene y consolida los vínculos sociales. Pero ajustan su conducta de acicalamiento de formas concretas para evitar a los compañeros del grupo que están contagiados, tal como informaron Clémence Poirotte y sus colaboradores en un informe publicado en 2017 en *Science Advances*. Los científicos observaron las interacciones diarias relacionadas con el acicalamiento de los mandriles en un parque de Gabón, y recogieron periódicamente muestras fecales para averiguar qué animales estaban gravemente infectados con parásitos intestinales. Los otros mandriles evitaban activamente acicalar a esos individuos. Podían detectar si un individuo estaba infectado basándose únicamente en el olor: los mandriles a los que les mostraban dos cañitas frotadas en las heces evitaban enérgicamente la correspondiente a otro mandril que tenía un montón de parásitos.

Pero, a pesar del posible contagio, los mandriles no siempre practican el distanciamiento social. En un estudio posterior, dirigido también por Poirotte, se observó que seguían acicalando a

RALF GELFAND, GETTY IMAGES (1); MIKE HILL, GETTY IMAGES (2)



ciertos parientes cercanos con niveles altos de parásitos, incluso cuando al mismo tiempo se distanciaban de otros miembros del grupo que también estaban infectados. En su publicación, aparecida en 2020 en *Biology Letters*, los investigadores afirmaban que mantener alianzas sólidas e incondicionales con ciertos parientes conlleva beneficios a largo plazo en los primates no humanos, como sucede en nuestra especie. En los mandriles, las hembras con los vínculos más fuertes empiezan a criar más pronto y tienen más descendencia a lo largo de su vida. Esos beneficios evolutivos asociados con mantener algunos lazos sociales pueden compensar el riesgo de una posible infección.

Los vínculos sociales de algunos animales que viven en grupos pueden ser tan importantes que nunca se favorecerá la evitación, ni siquiera cuando algunos individuos estén claramente enfermos. Un trabajo dirigido por Bonnie M. Fairbanks y publicado en 2015 en *Behavioral Ecology and Sociobiology* demostró que las mangostas rayadas no evitan a los miembros del grupo aunque estos muestren claros signos de estar enfermos. La mangosta rayada es una especie altamente social nativa del África subsahariana que vive en grupos estables de hasta 40 individuos, tanto de la misma familia como no emparentados. Los miembros del grupo participan en interacciones físicas cercanas, ya que descansan unos sobre otros y se turnan para acicalarse entre sí.

Kathleen A. Alexander, de Virginia Tech, otra autora del artículo, se percató de que numerosas mangostas de su área de estudio en Botsuana habían enfermado con una nueva forma de tuberculosis que tarda meses en causarles la muerte. Fairbanks pasó meses siguiendo de cerca a seis grupos afectados por esta enfermedad, observando todas las interacciones sociales entre los miembros. Sorprendentemente, las mangostas sanas seguían participando en las interacciones cercanas con los miembros visiblemente enfermos. De hecho, les dedicaban el mismo tiempo que a sus compañeros sanos, aunque las mangostas enfermas no solían responder con el mismo empeño. El distanciamiento de los individuos enfermos puede no ser sostenible en especies cuya cooperación íntima con otros congéneres a la hora de cazar y defenderse puede suponer la diferencia entre vivir y morir.

SEGUIR EL EJEMPLO DE LA NATURALEZA

Al igual que el resto de los animales, los humanos poseemos una larga historia evolutiva relacionada con las enfermedades infecciosas. Muchas de nuestras propias formas de inmunidad por comportamiento, como la sensación de incomodidad en ambientes sucios o atestados, son, posiblemente, una consecuencia de esa historia. Pero los humanos de hoy, a diferencia de otros animales, tenemos muchas ventajas cuando una epidemia llama a nuestra puerta. Podemos informar a todo el mundo y al instante sobre las posibles amenazas. Esta capacidad nos permite implantar el distanciamiento social antes de que aparezca la enfermedad en nuestra comunidad local, una táctica que ha salvado muchas vidas. Disponemos de plataformas digitales de comunicación muy avanzadas, desde el correo electrónico hasta videollamadas en grupo, que nos permiten mantener nuestra distancia física mientras seguimos conservando algunas de nuestras conexiones sociales. Otros animales pierden los vínculos sociales a causa del distanciamiento. Pero puede que la mayor ventaja humana sea la capacidad de desarrollar herramientas complejas que no tienen que ver con el comportamiento, como las vacunas, que previenen la aparición de la enfermedad sin la necesidad de implantar costosos cambios en nuestro comportamiento. La vacunación nos permite mantener una vida social rica e interactiva a pesar de la existencia de enfermedades contagiosas como la polio y el sarampión que, de otro modo, podrían causar estragos en nuestra especie.

No obstante, cuando se trata de detener enfermedades nuevas, como la COVID-19, nos hallamos en el mismo barco que los demás animales. En tales casos, los comportamientos cuya eficacia ya se ha demostrado, entre ellos el distanciamiento social, son nuestras mejores herramientas hasta que se disponga de alguna vacuna o tratamiento. Pero, igual que los animales, tenemos que ser estratégicos. Como los mandriles y las hormigas, podemos mantener las interacciones sociales más esenciales y distanciarnos de aquellos que son más vulnerables y a los que podríamos infectar accidentalmente. El éxito de las langostas espinosas contra un virus devastador en el Caribe demuestra que los costes a corto plazo derivados del distanciamiento, aunque son graves, son compensados por los beneficios a largo plazo para la supervivencia. Por muy antinatural que pueda parecernos, necesitamos seguir el ejemplo de la naturaleza. IyC

PARA SABER MÁS

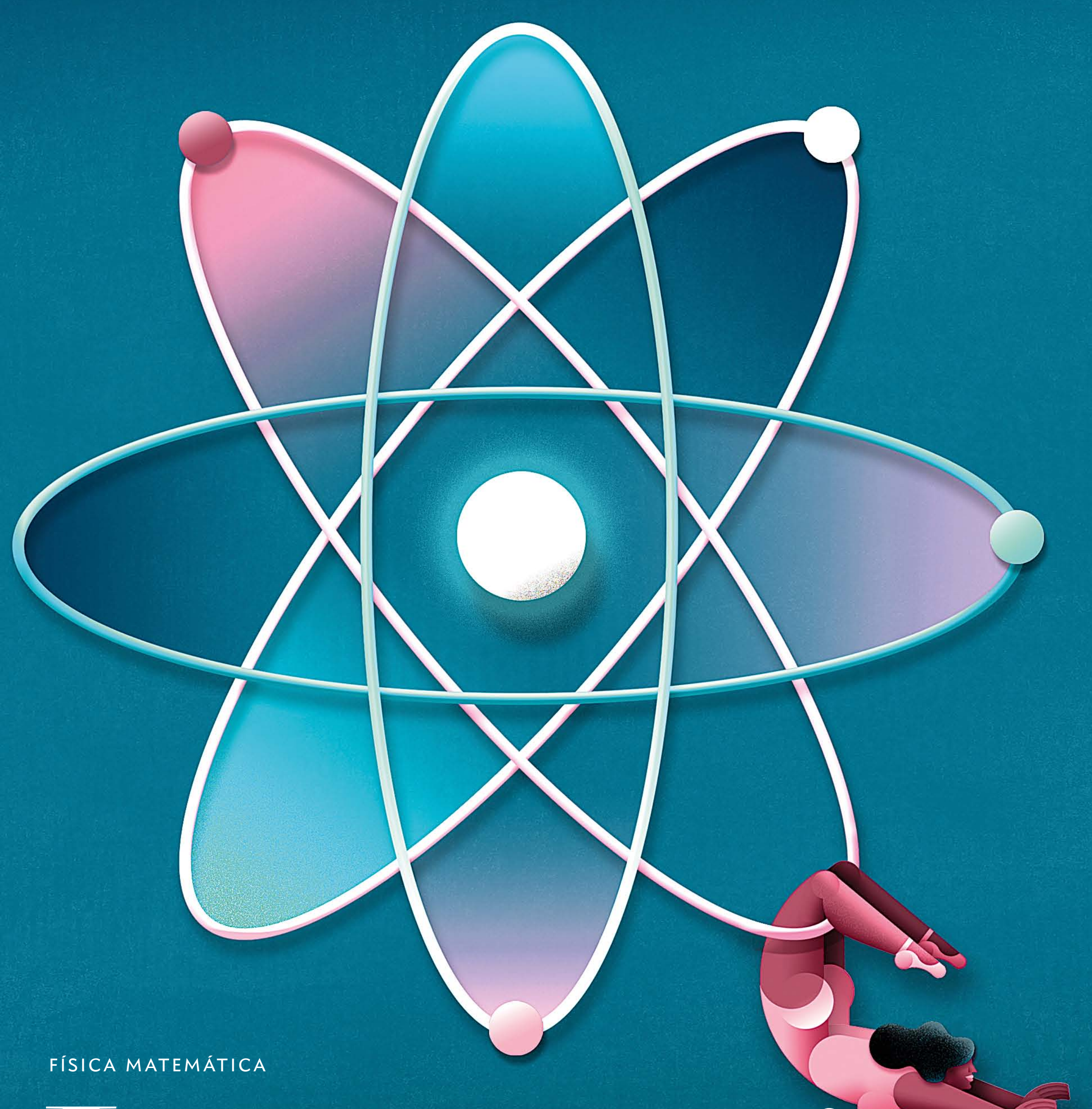
Infection-avoidance behaviour in humans and other animals. Valeri A. Curtis en *Trends in Immunology*, vol. 35, págs. 457-464, octubre de 2014.

No evidence for avoidance of visibly diseased conspecifics in the highly social banded mongoose (*Mungos mungo*). Bonnie M. Fairbanks, Dana M. Hawley y Kathleen A. Alexander en *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 69, n.° 3, págs. 371-381, marzo de 2015.

Ecological and evolutionary consequences of parasite avoidance. J. C. Buck, S. B. Weinstein y H. S. Young en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 33, n.° 8, págs. 619-632, agosto de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

La influencia de la vida social en la salud. Lydia Denworth en *IyC*, septiembre de 2019.



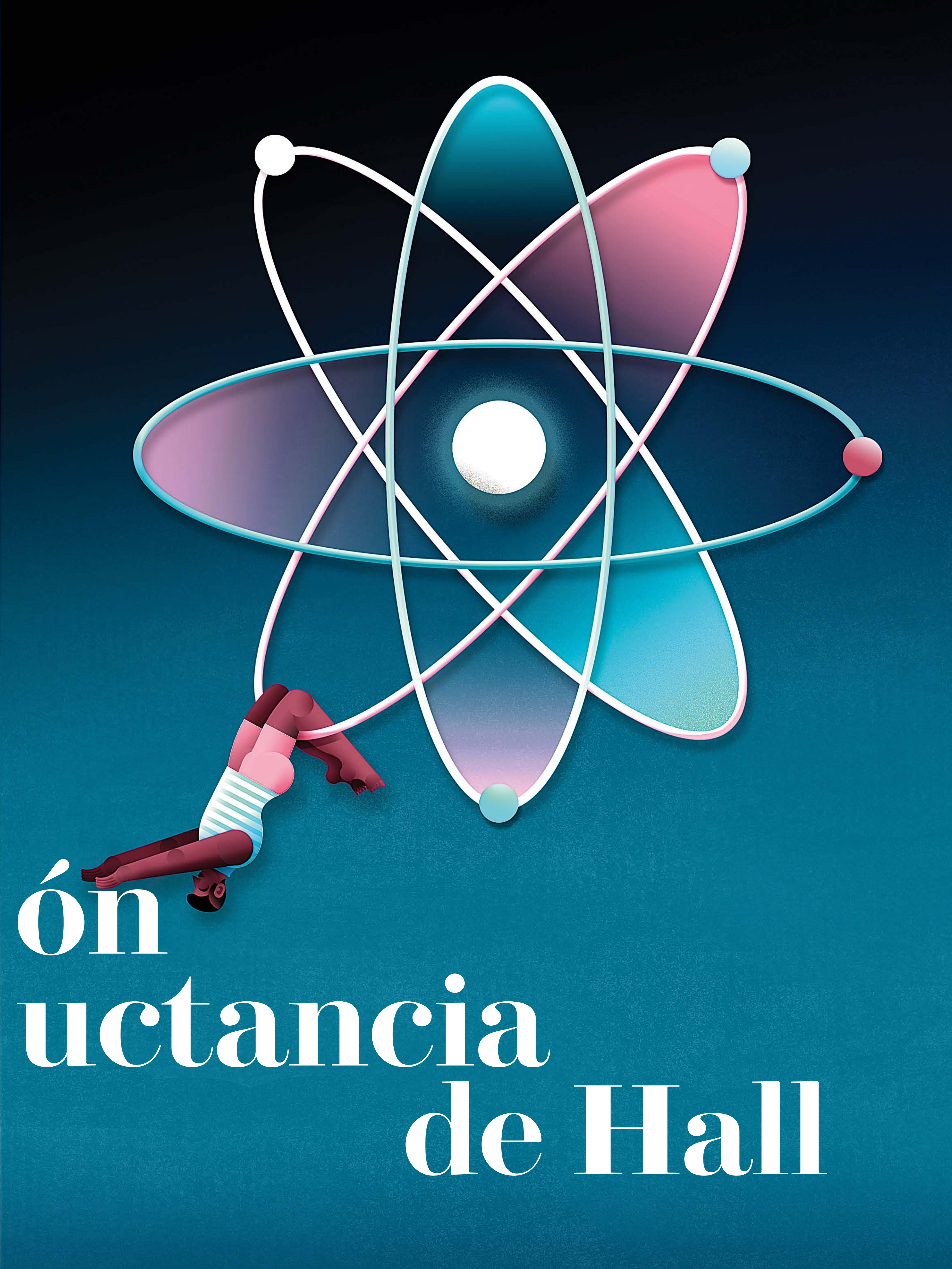
FÍSICA MATEMÁTICA

La cuantizaci de la cond

Los científicos han logrado explicar por qué se observa un cierto fenómeno cuántico a escalas macroscópicas

Spyridon Michalakis

Ilustración de María Corte


ón
uctancia
de Hall

Spyridon Michalakis es físico matemático y responsable de divulgación en el Instituto para la Información y la Materia Cuánticas del Instituto de Tecnología de California.



Estoy solo, sentado en el extremo de una gran mesa de reuniones, cuando me saluda una voz extrañamente familiar: «¡Hola, tú debes de ser Spiros!». Me giro y descubro al actor de Hollywood Paul Rudd, luciendo su célebre y encantadora sonrisa. Viene en chándal, de vuelta de algún tipo de entrenamiento para superhéroes.

Minutos más tarde, me rodea un corrillo de gente del cine. Rudd va al grano: «Entonces, ¿qué tipo de cosas alucinantes ocurren cuando uno se encoge?». Me han traído en avión para que les asesore sobre la física de *Ant-Man*, la película de superhéroes de los estudios Marvel, y no puedo defraudarlos. Sin embargo, lo único que sé acerca de menguar hasta el tamaño de una hormiga proviene de haber visto con nueve años la película *Cariño, he encogido a los niños*. Por un instante, estoy tentado de decirles que han acudido a la persona equivocada, pero no puedo dejar escapar esta oportunidad. Quizá no sepa mucho sobre hormigas, pero sé un par de cosas sobre física cuántica. «Cuando nos encogemos a la escala cuántica, los conceptos de espacio y tiempo pierden su significado habitual», respondo con seguridad. Los miro y me doy cuenta de que eso es lo último que esperaban oír, pero los tengo enganchados. Durante las dos horas siguientes profundizo cada vez más en las reglas y rarezas de la mecánica cuántica.

Al día siguiente, uno de los productores me escribe un correo electrónico: «Oye, ¿cómo deberíamos llamar al lugar donde uno entra cuando se encoge hasta un tamaño microscópico?». «¿Qué tal el "reino cuántico"?», tecleo. Cinco años después, en 2019, los Vengadores de Marvel entran en el reino cuántico y viajan al pasado para salvar el universo. De repente, ser un experto en mecánica cuántica es algo genial.

No siempre me interesaron la física o los superhéroes. En la universidad me especialicé en matemáticas e informática, y me pasaba los veranos intentando predecir cómo se pliegan las cadenas unidimensionales de ADN para dar lugar a proteínas tridimensionales. Hasta el doctorado no asistí a mi primera clase de física, más allá de los fundamentos que había adquirido en el grado. Mi director de tesis en la Universidad de California en Davis había decidido matricularme en un curso de posgrado de mecánica cuántica, y no tuve más remedio que aceptar. Cuando el primer día de clase nos repartieron un cuestionario para evaluar nuestros conocimientos previos, entregué el mío con mi nombre y una carita sonriente al lado. Pero perseveré, y en junio de 2008 me doctoré en matemática aplicada, especializándome en física matemática y teoría cuántica de la información. Tres meses después, me trasladé a Nuevo México para trabajar como investigador posdoctoral en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, el lugar donde nació la bomba atómica. En aquel momento no lo sabía, pero durante el siguiente año me iba a sumergir aún más en el mundo cuántico. Esta es la historia de lo que descubrí allí y de cómo volví para contárselo a Marvel.

ALGO INTERESANTE

Todo empezó con una pregunta sencilla.

Mi supervisor en Los Álamos, Matthew Hastings, un prometedor científico y una de las mentes más agudas de la física, se sentaba frente a mí en un restaurante de sushi cuando me planteó la disyuntiva que lo cambió todo: «En cuanto a tu posdoctorado en nuestro laboratorio, ¿quieres empezar con algo para ir entrando en calor o prefieres un problema interesante?». Sin pedirle más explicaciones, repliqué: «Quiero trabajar en algo interesante». Matt pareció satisfecho con mi respuesta. Ese mismo día me envió un enlace a una lista con 13 cuestiones físicas sin resolver, gestionada por el profesor de la Universidad de Princeton Michael Aizenman, uno de los grandes nombres de la física matemática. Iba a trabajar en el segundo de los problemas allí mencionados, propuesto por los físicos matemáticos Joseph Avron y Ruedi Seiler: «¿Por qué está cuantizada la conductancia de Hall?».

El lector probablemente se preguntará qué es la conductancia de Hall y qué significa que esté cuantizada. Por aquel entonces, yo me hacía esas mismas preguntas. Ninguno de los problemas de la lista tenía la palabra «¡RESUELTO!» al lado salvo el tercero, crípticamente titulado *Exponentes y dimensiones*; y haciendo clic sobre él vi que, en realidad, lo habían solucionado solo en parte. Eso sí, uno de esos avances parciales había valido una medalla Fields (uno de los premios más prestigiosos en matemáticas) en 2006, y el otro la recibiría cuatro años más tarde. Visto lo visto, estaba claro que el problema que me habían propuesto no era una cuestión menor. Me planteé seriamente si sería capaz de resolverlo en el plazo de un año. La razón de mi urgencia era que los contratos posdoctorales en física o matemáticas suelen durar dos años. Si al final del primero has realizado un gran trabajo de investigación, es posible solicitar un puesto con opciones de permanencia en una universidad de primer nivel. Si el trabajo es bueno pero no excepcional, puedes

EN SÍNTESIS

El efecto Hall cuántico es un fenómeno macroscópico que involucra una corriente eléctrica en una superficie conductora cuya resistencia está cuantizada.

Explicar esa cuantización, una propiedad normalmente circunscrita al dominio microscópico, se consideraba uno de los grandes problemas sin resolver de la física.

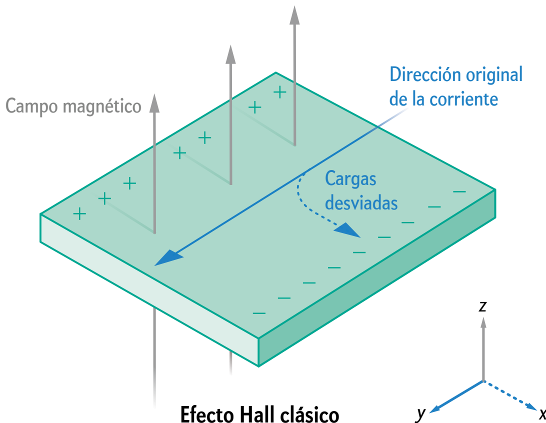
Recientemente, los físicos matemáticos han hallado una demostración basada en la topología, el estudio de las propiedades de las formas.

buscar un segundo contrato posdoctoral o una plaza en una institución menos competitiva. Y si no has obtenido ningún resultado... siempre queda Wall Street.

Pero la idea de echarme atrás sin ni siquiera intentarlo me resultaba difícil de aceptar. Para alguien que se ha criado en Spata, una pequeña ciudad a las afueras de Atenas, los grandes sueños no son algo habitual. Mi padre creció en la misma casa que yo, jugando al fútbol y metiéndose en peleas. Cuando dejó el instituto, mi abuelo le ofreció trabajar en la tienda de comestibles del barrio, pero mi padre no quiso: pese a haber abandonado los estudios, tenía ambición. Trabajó en una inmobiliaria de la zona y aprendió los entresijos de la compraventa de terrenos. Más tarde, gracias a la insistencia de mi madre, volvió a las aulas para obtener el título de bachillerato. Cuando mi hermano mayor, Nikos, trajo a casa su primer boletín de notas, mi padre lloró de felicidad al ver que su hijo era un buen estudiante. Nikos y yo acabaríamos compitiendo en la Olimpiada Internacional de Matemáticas, un honor reservado cada año a tan solo seis estudiantes de secundaria de cada país. Uno tras otro, Nikos, yo y mi hermano pequeño Marios iríamos pasando de nuestra escuela de enseñanza media en Atenas al Instituto de Tecnología de Massachusetts, un logro inusual para cualquier familia —más aún para una de ingresos modestos— y que da testimonio de la labor de mis padres.

Pensé que si ellos habían conseguido hacer milagros, quizás yo también podría. Así que, en otoño de 2008, comencé a trabajar en el segundo problema de la lista, con el objetivo, tal y como allí se decía, de «formular una teoría del efecto Hall cuántico entero que explique la cuantización de la conductancia de Hall, de modo que también sea válida para electrones que interaccionan en el límite termodinámico».

El efecto Hall cuántico entero tiene una larga historia. El efecto Hall original fue descubierto en 1879 por Edwin H. Hall, un estudiante de la Universidad Johns Hopkins. El joven científico quiso poner en tela de juicio un enunciado de James Clerk Maxwell, el padre del electromagnetismo. En su *Tratado de electricidad y magnetismo*, de 1873, Maxwell afirmó con rotundidad que, en presencia de un campo magnético, un material conductor por el que circulase una corriente eléctrica se doblaría debido a la fuerza magnética sobre el material, no sobre la corriente. Maxwell concluyó que «cuando se hace actuar una fuerza magnética constante sobre el sistema, [...] la distribución de la corriente será la misma que si no actuara ninguna fuerza magnética». Para poner a prueba esta idea, Hall hizo circular una corriente eléctrica a través de una fina lámina de oro situada en el seno de un campo magnético perpendicular a su superficie.

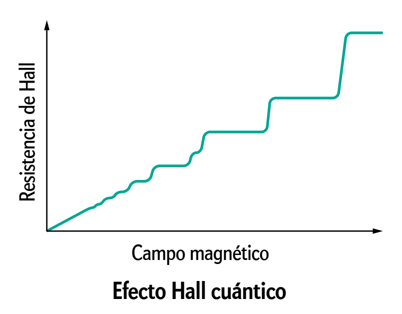


Efecto Hall clásico

ILUSTRACIONES DE LUCY READING-IKKANDA

Hall comprobó que su galvanómetro registraba una corriente (lo cual implicaba la existencia de un voltaje) en la dirección perpendicular a la de la corriente original. Concluyó que el campo magnético empujaba los electrones de la corriente hacia uno de los bordes del conductor, cambiando así su distribución en la superficie del material: Maxwell estaba equivocado. Esa acumulación inesperada de carga a lo largo de los bordes del conductor pasó a conocerse como el voltaje de Hall.

El efecto Hall cuántico se descubrió casi un siglo después, el 5 de febrero de 1980, en un laboratorio de Grenoble. El físico experimental Klaus von Klitzing pretendía estudiar con más detalle el efecto Hall a temperaturas extremadamente bajas y en presencia de campos magnéticos muy intensos. Buscaba pequeñas desviaciones respecto al efecto esperado en ciertos semiconductores bidimensionales, los materiales en que se basan los transistores modernos. En concreto, trataba de medir la resistencia de Hall, una cantidad proporcional al voltaje de Hall. Y halló algo sorprendente: ¡esa resistencia estaba cuantizada! Es decir, que la resistencia entre los bordes del material no crecía de manera gradual al aumentar el campo magnético, como había observado originalmente Hall y predecía la física conocida en ese momento, sino que se mantenía constante y saltaba a un nuevo valor cuando el campo se volvía lo bastante intenso. Lo más asombroso era que los valores de la conductancia de Hall (el inverso de la resistencia de Hall) eran múltiplos enteros de una cantidad íntimamente relacionada con la constante de estructura fina, una constante fundamental de la naturaleza que describe la intensidad de la interacción electromagnética entre partículas elementales cargadas. Así es como nació el efecto Hall cuántico.



Efecto Hall cuántico

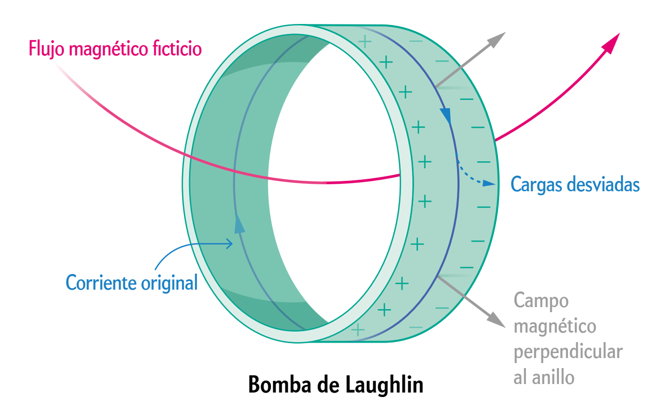
El descubrimiento de Von Klitzing constituyó una sorpresa, en particular porque se suponía que la constante de estructura fina describía propiedades cuánticas que operaban a escalas demasiado pequeñas para que un efecto macroscópico como la conductancia de Hall fuese capaz no ya de explorarlas, sino de definirlas con gran precisión. Y aun así, la conductancia de Hall no solo captaba un aspecto esencial del mundo microscópico de la física cuántica, sino que lo hacía de manera muy robusta: las mesetas en la resistencia de Hall aparecían aunque cambiasen el tamaño, la pureza o incluso el tipo de material semiconductor usado en el experimento. Era como si una sinfonía de un cuatrillón de electrones mantuviera su afinación colectiva a lo largo de enormes distancias atómicas sin necesitar un director de orquesta y, más increíble si cabe, permaneciera inmune a la física que había mantenido el dominio cuántico a salvo de injerencias macroscópicas durante miles de millones de años.

Aquel día se abrió una puerta al mundo cuántico, un acceso macroscópico que muchos pensaban que no existía. En 1985, cinco años después del descubrimiento, Von Klitzing recibió el

premio Nobel de física. Su hallazgo conduciría a nuevos avances y a otros tres premios Nobel, concedidos en 1998 a dos físicos experimentales (Horst Störmer y Daniel Tsui) y uno teórico (Robert Laughlin) por descubrir que la acción colectiva de los electrones en un campo magnético puede dar lugar a nuevos tipos de «partículas», cuyas cargas eléctricas son fracciones de la del electrón. Este fenómeno recibe el nombre de efecto Hall cuántico fraccionario.

LA BOMBA CUÁNTICA DE LAUGHLIN

Laughlin fue uno de los primeros físicos que intentaron explicar el efecto Hall cuántico. En 1981 concibió un brillante experimento mental, una simulación idealizada del experimento original que ofrecía una metáfora matemática para entenderlo. Se imaginó un conductor en forma de anillo con un campo magnético perpendicular a su superficie, y añadió una línea de campo ficticia (un flujo magnético) que atravesaba el aro, como un hilo que enhebra una aguja. Al aumentar ese flujo ficticio se induce una corriente eléctrica a lo largo del conductor, que es la corriente original presente en el efecto Hall clásico. El proceso, denominado bomba cuántica de Laughlin, completa un ciclo cada vez que el flujo magnético ficticio se incrementa en un «cuanto de flujo», una cantidad definida como h/e, donde h es la constante de Planck y e la carga del electrón.



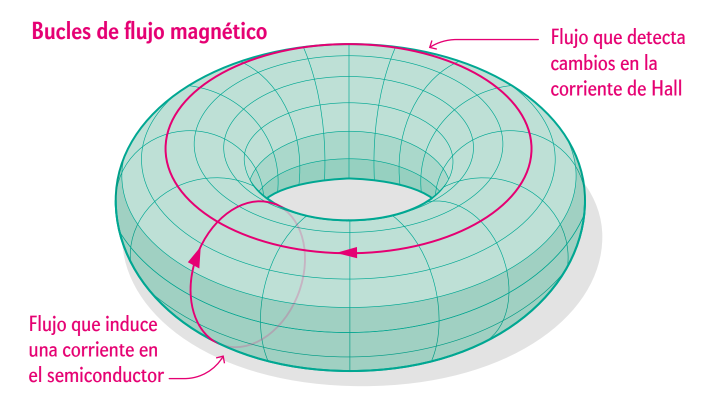
Tras cada ciclo, el sistema cuántico retorna a su estado original debido a un fenómeno conocido como invariancia gauge. Según el razonamiento de Laughlin, eso implica que la conductancia está cuantizada, con números enteros que se corresponden con el número de electrones transferidos de un borde del anillo al otro por la bomba cuántica. ¡Genial! Pero había un problema. En los experimentos, la conductancia de Hall se medía (y promediaba) a partir de un número muy grande de ciclos de la bomba. Dado que Laughlin asumía (correctamente) que el sistema venía descrito por la mecánica cuántica, no había ninguna garantía de que en cada ciclo se transfiriera el mismo número de electrones. Como escribirían más tarde Avron, Seiler y Daniel Osadchy, «reproducir exactamente un estado solo garantiza reproducir el resultado de la medida en la mecánica clásica. En la mecánica cuántica, reproducir el estado del sistema no conduce necesariamente a la misma medida. Así que no es posible concluir únicamente a partir de la invariancia gauge que en cada ciclo de la bomba se transfiere el mismo número de electrones». Los físicos necesitaban un nuevo marco conceptual para demostrar que el número medio de electrones transmitidos a lo largo de varios ciclos también era un número entero.

Inspirados por el argumento de Laughlin, los siguientes intentos de explicar la cuantización de la conductancia de Hall se basaron en la idea de evolución adiabática: la evolución de un sistema que permanece en todo momento en su estado de mínima energía, mientras varía algún parámetro externo. Cuando el «salto espectral» del sistema (la energía requerida para pasar del estado fundamental a uno excitado) es pequeño, la evolución adiabática se ralentiza para evitar que el sistema abandone el estado de mínima energía. El argumento original de Laughlin usaba esta idea para modelizar matemáticamente el efecto Hall cuántico como la evolución adiabática del estado electrónico del sistema al incrementar el flujo magnético ficticio.

PLASTILINA IRROMPIBLE

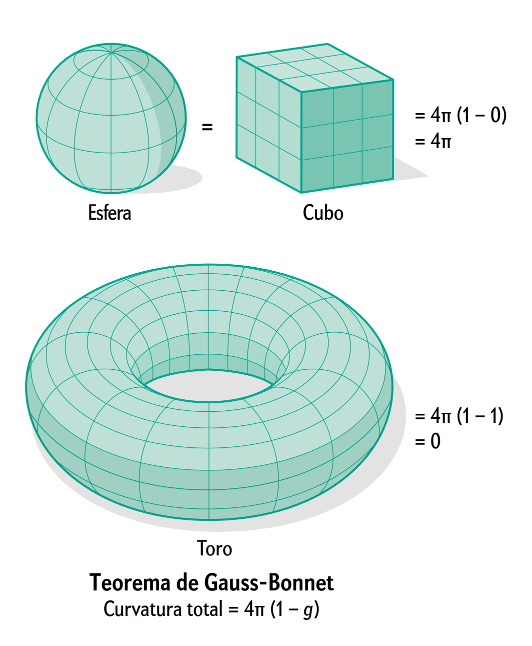
Para estudiar el efecto Hall cuántico con más profundidad, los físicos recurrieron a la topología, una rama de las matemáticas que se centra en la esencia de las formas: las propiedades que no cambian aunque las deformemos de manera continua. Pensemos en una plastilina que sea irrompible y no pueda pegarse consigo misma. Podríamos convertir un cubo hecho de ese material en una esfera (redondeando las aristas y los vértices), pero nunca lograríamos transformarlo en una rosquilla, ya que para eso habría que agujerear el cubo, o estirarlo y pegar los extremos entre sí. Así pues, desde el punto de vista de la topología, los cubos y las rosquillas son formas diferentes, mientras que los cubos y las bolas son iguales, a pesar de que sean objetos geométricos distintos. La topología se formalizó en 1895, pero no interaccionó demasiado con la física hasta las décadas de 1950 y 1960.

Los esfuerzos iniciales por entender el papel de la topología en el efecto Hall cuántico se consideraron tan importantes que los físicos teóricos David Thouless y F. Duncan M. Haldane recibieron el premio Nobel en 2016 por su trabajo en ese campo. En particular, Thouless y sus colaboradores ampliaron el argumento de Laughlin al demostrar que la conductancia de Hall también estaba cuantizada en promedio, para lo cual tuvieron que introducir un segundo flujo ficticio. En su nuevo experimento mental, uno de los flujos inducía una corriente eléctrica a lo largo de un semiconductor y el otro detectaba cambios en la corriente entre los ciclos de la bomba, que se simulaban con distintas condiciones iniciales. La evolución adiabática generada por el flujo ficticio adicional tenía el efecto de promediar sobre muchos ciclos de la bomba de Laughlin y mostraba que la conductancia media de Hall estaba cuantizada.

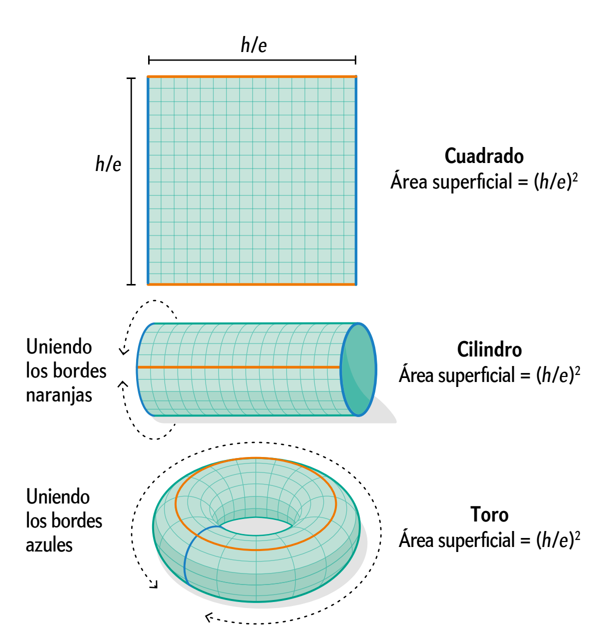


Por esa misma época, Barry Simon, físico matemático del Instituto de Tecnología de California, se dio cuenta de que la evolución adiabática establecía un puente matemático entre la

conductancia de Hall y la curvatura local del espacio de fases bidimensional generado por los dos flujos magnéticos ficticios. Esa curvatura local se llama curvatura de Berry en honor a su descubridor, el físico matemático Michael Berry. Lo que demostró Simon es que la conductancia de Hall era igual a la curvatura local en el origen del espacio de fases multiplicada por $h/2\pi$. Y eso era crucial. El teorema de Gauss-Bonnet, un famoso resultado matemático de 1848, afirmaba que la curvatura total de una forma geométrica es una propiedad topológica, no geométrica. En otras palabras, la suma de todas las curvaturas locales de una forma tridimensional es la misma para todas las formas topológicamente equivalentes. Dicha curvatura total viene dada por $2\pi(2-2g)$, donde g es el número de agujeros de la forma.

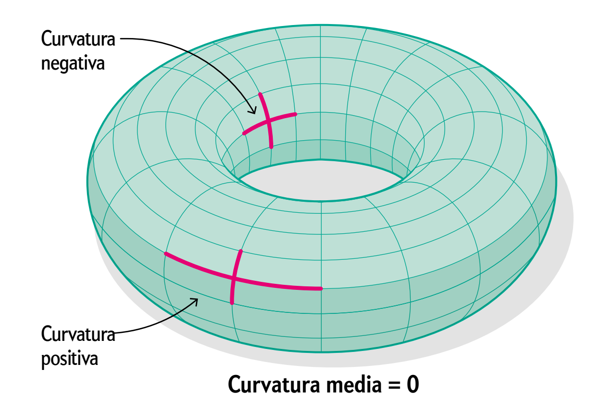


Teorema de Gauss-Bonnet
Curvatura total = $4\pi(1 - g)$



Lo más importante para nosotros era que una generalización moderna del teorema de Gauss-Bonnet, debida al geómetra Shiing-Shen Chern, demostraba que el mismo resultado era válido para la curvatura de Berry total del espacio de fases bidimensional que describe el efecto Hall cuántico. La curvatura de Berry de ese espacio es $2\pi C$, donde C es un número entero conocido como el primer número de Chern. Para probar que la conductancia de Hall estaba cuantizada, Simon y sus colaboradores estudiaron el promedio de la conductancia en todo el espacio de fases, que es igual al factor $h/2\pi$ multiplicado por la curvatura total y dividido por el área superficial. Sustituyendo $2\pi C$ para la curvatura total y $(h/e)^2$ para el área (*véase la siguiente figura*), la conductancia promedio resulta ser $C \times e^2/h$. ¡Conseguido! La conductancia media de Hall era un múltiplo entero de e^2/h, como ya había demostrado Thouless. Pero, por vez primera, el entero que multiplica a e^2/h se identificaba con un «invariante topológico», una propiedad que no cambia si deformamos o rotamos la forma. Por lo tanto, el resultado era insensible a pequeñas perturbaciones o imperfecciones en la realización física del efecto Hall cuántico. Era un avance revolucionario.

Por desgracia, la belleza de estos argumentos de Thouless y Simon quedaba empañada por un serio problema: la conductancia de Hall que medían los experimentales se correspondía con la curvatura local en el origen del espacio de fases bidimensional, no con la curvatura media de todo el espacio. Para entender por qué la curvatura local de una forma arbitraria casi nunca coincide con su curvatura media, consideremos un toro. El teorema de Gauss-Bonnet implica que la curvatura media de un toro (y de cualquier forma con un solo agujero) es cero. Sin embargo, en la mayoría de los puntos del toro la curvatura local no es cero, y puede tomar valores tanto positivos como negativos. Thouless y sus colaboradores habían intentado resolver este problema, pero la cuestión seguía ahí: ¿por qué estaba cuantizada la conductancia de Hall, si no era posible promediar sobre todas las posibles condiciones iniciales de la bomba de Laughlin? Esa era la pregunta que yo debía responder.



Curvatura media = 0

UNA SENSACIÓN DE DESESPERANZA

Se suponía que un libro de Thouless, *Topological quantum numbers in nonrelativistic physics*, debía guiar mis primeros pasos en el misterio del efecto Hall cuántico. Un par de semanas después de que Matt me pasara una copia, decidí que no tenía los conocimientos necesarios para comprender la física allí descrita. Guardé el libro en un cajón de mi escritorio y puse la llave a buen recaudo. Aun así, la mera existencia del libro me generaba desesperanza. ¿Cómo iba a avanzar si no era capaz de entender su contenido? En esos momentos, mi mente estaba en blanco.

Por supuesto, tenía la opción de pedirle ayuda a Matt. Él podía enseñarme lo que necesitaba saber, e incluso podríamos

colaborar estrechamente en la resolución del problema. Pero uno o dos meses después de mi llegada a Los Álamos, Matt me anunció que dejaba el laboratorio. Se pasaba la mayor parte del tiempo haciendo entrevistas de trabajo, y yo apenas lo veía. Unos meses más tarde, le ofrecieron un puesto en el laboratorio Station Q de Microsoft, en Santa Barbara, y eso casi puso punto y final a nuestra interacción. Las pocas veces que nos vimos me quedó claro que Matt había cometido un grave error al ofrecerme el puesto. Él hablaba y yo solo lograba quedarme con algunas combinaciones de palabras. Una de las frases que más repetía era «continuación cuasiadiabática», una idea que no me resultaba familiar y que, para colmo de males, no aparecía en la ingente bibliografía sobre el efecto Hall cuántico.

BÚSQUEDAS A CIEGAS

Sin mucho más en lo que apoyarme, hice lo que habría hecho cualquier científico joven de mi generación: busqué en Google «efecto Hall cuántico» y «continuación cuasiadiabática» (CCA). La primera búsqueda devolvió cientos de artículos científicos, pero no tuve mucha más suerte con ellos que con el libro de Thouless. Lo que sí saqué en claro fue la presencia reiterada de un término en relación con el efecto Hall cuántico: «topológico». Lo añadí a una nueva búsqueda, y lo primero que apareció fue un artículo de Avron, Osadchy y Seiler titulado *A topological look at the quantum Hall effect*. El texto, publicado en *Physics Today* en agosto de 2003, se dirigía a físicos no expertos en el tema y estaba escrito de forma tan clara que fue la base sobre la que edifiqué mi comprensión del efecto Hall cuántico.

Por contra, mi búsqueda sobre la CCA solo arrojó dos resultados, ambos textos de Matt. El primer artículo, escrito junto al físico teórico Xiao-Gang Wen, era una introducción a la CCA. El segundo incluía un breve apartado sobre cómo usarla para calcular una versión de la curvatura de Berry que resultaba relevante para el efecto Hall cuántico. Este artículo constituía el único intento publicado de aplicar la CCA a cualquier tipo de curvatura de Berry. Estaba impaciente por escudriñar los argumentos de Matt, pero antes necesitaba entender qué era la CCA y cómo estaba conectada con la evolución adiabática. Así que me puse con el primer artículo y, tras un mes de trabajo, sentí que había alcanzado un buen dominio de la técnica. La CCA era un tipo de evolución diseñada para preservar ciertas propiedades topológicas del estado cuántico de un sistema. En cambio, la evolución adiabática se refería a propiedades geométricas locales como la curvatura de Berry.

El siguiente paso era descubrir cómo usar la CCA para calcular la curvatura de Berry. Para mi consternación, no conseguía entender el breve argumento de Matt sobre el modo de conectar ambos conceptos. Así que decidí reconstruir esa conexión (o al menos mi versión de ella) desde cero. La idea era seguir el argumento de Simon que relacionaba la curvatura de Berry con la evolución adiabática, sustituyendo esta por la CCA. Este intercambio de evoluciones funcionó de maravilla por una sencilla razón, y es que logré demostrar que la CCA era idéntica a la evolución adiabática bajo una condición especial: que, durante toda la evolución del sistema, el salto de energía entre el estado fundamental y el primer estado excitado fuese mayor que cierto valor positivo, independiente del tamaño del sistema. Por suerte, esta condición se satisfacía precisamente cerca del origen del espacio de fases bidimensional. Más aun, probé que si la condición no se cumplía, la conductancia de Hall no estaba cuantizada.

Tras conectar la CCA con la curvatura de Berry y, por lo tanto, con la conductancia de Hall, dirigí mi atención al siguiente obstáculo: recrear el argumento de Simon que calculaba la conductancia media de Hall como un invariante topológico asociado al primer número de Chern. Y eso no iba a ser fácil. Como he explicado, para superar el problema inicial de replicar la evolución adiabática usando la CCA, había aprovechado que ambas eran iguales siempre que el salto espectral entre el estado fundamental y los estados excitados del sistema fuese lo bastante grande. Lamentablemente, cuando empecé a explorar con más detalle el espacio de fases bidimensional cuya curvatura total debía calcular, tuve que descartar esa hipótesis sobre el salto espectral. En realidad, la suposición era tan potente que todos los intentos de cuantizar la conductancia de Hall realizados hasta entonces la habían empleado: nadie pensaba que fuera posible probar la cuantización sin esa hipótesis adicional, y yo tampoco. Cuando contacté con Matt a finales de la primavera de 2009 y le mostré una solución que hacía uso de la suposición, su comentario fue: «Buen trabajo. Pero creo que podrías demostrarlo sin ella». Y me remitió a un artículo suyo sin aparente relación con el problema, titulado *Lieb-Schultz-Mattis in higher dimensions* (LSM), donde había sentado las bases para eliminarla.

OTRO GUIÑO DEL DESTINO

Al comenzar a leer ese artículo, me invadió la misma zozobra que cuando trataba de entender los intentos de Matt de conectar la CCA con la curvatura de Berry. Descifrarlo en solitario sería un proceso largo y trabajoso. Pero, en un segundo guiño del destino, mi director de tesis, Bruno Nachtergaele, había publicado con uno de sus investigadores posdoctorales de entonces, Robert Sims, lo que algunos consideraban una versión matemáticamente rigurosa del artículo LSM. Aunque la mayoría de las ideas brillantes estaban ya en el artículo de Matt, la versión de Bruno estaba tan bien escrita y era tan minuciosa que en un mes tuve una idea clara de cómo proceder. Ahora sabía cómo adaptar elementos del argumento de LSM para superar el segundo escollo: demostrar que la conductancia media de Hall calculada usando la CCA en vez de la evolución adiabática seguía siendo un múltiplo entero de e^2/h.

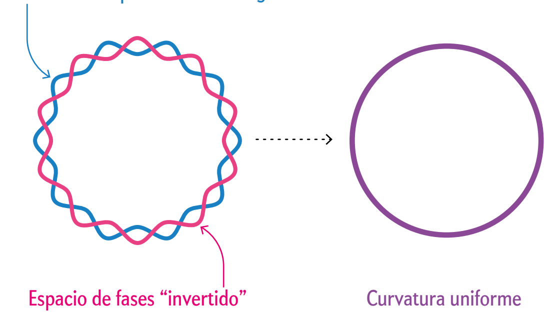
El argumento original de la bomba de Laughlin, que empleaba la evolución adiabática y la invariancia gauge para deducir el retorno del sistema al estado original después de cada ciclo, no funcionaba con la CCA. El principal problema era que la CCA no garantizaba que el sistema acabara en el mismo estado cuántico de partida tras insertar un cuanto de flujo. La evolución adiabática conseguía esto prohibiendo que el estado de mínima energía se excitase. La CCA funcionaba de manera distinta: si al aumentar el flujo magnético el salto espectral disminuía por debajo de cierto valor crítico, la CCA permitía alegremente que el sistema abandonase el estado fundamental y pasara a un nuevo estado cuántico excitado. Por desgracia para mí, eso significaba que, aunque la dinámica que describe el sistema retornase al estado original al final de cada ciclo de Laughlin, el estado cuántico podía haber cambiado de forma significativa. Y si ocurriera eso, uno de los elementos clave de los argumentos de Laughlin y Thouless se vendría abajo.

Para superar esa dificultad, tuve que introducir otros dos flujos magnéticos ficticios, aparte de los dos originales. Eso me permitió transformar la evolución bajo la CCA en otra que garantizaba el retorno del sistema al estado fundamental al final de cada ciclo. Este truco, que tomé prestado del artículo LSM de Matt, obligaba al estado del sistema a mantener exactamente la misma energía durante la evolución modificada a lo largo de la frontera del espacio de fases bidimensional, incluso si esa

energía ya no correspondía a la energía mínima del sistema. Es decir, que todo lo que hacía falta saber para garantizar la vuelta del sistema al estado de partida era que los estados inicial y final tenían la misma energía. El hecho de que el estado fundamental del sistema estuviera determinado de manera unívoca por el valor de su energía se encargaba del resto. La exigencia de la evolución adiabática de que el sistema permaneciese siempre en el estado de mínima energía era excesiva. Como comprendería más adelante, la insistencia en usar la evolución adiabática para cuantizar la conductancia de Hall era la razón principal de que apenas se hubieran hecho progresos durante casi dos décadas.

Llegado a este punto, me sentía exhausto, pero el principal obstáculo estaba por fin a la vista. Todo lo que había conseguido hasta entonces era una manera elaborada de probar lo que Thouless, Simon y sus colaboradores ya habían demostrado: que la conductancia media de Hall estaba cuantizada en múltiplos enteros de e^2/h. Podría parecer que no había hecho ningún progreso al eliminar la hipótesis del promedio que aparecía en todos los intentos de explicar el efecto Hall cuántico entero. Salvo por un pequeño detalle: el espacio de fases bidimensional generado por la CCA tenía una curvatura de Berry casi perfectamente uniforme. Eso quería decir que la conductancia de Hall real (la que correspondía a la curvatura de Berry en una pequeña región cerca del origen del espacio de fases bidimensional) era igual a la curvatura promediada sobre el espacio de flujo total. Dado que este último estaba cuantizado, se seguía que la conductancia de Hall también debía estarlo. *Quod erat demostrandum*, QED.





Cada uno de los flujos adicionales genera una versión invertida del espacio de fases, de modo que el nuevo espacio tiene curvatura uniforme.

LECCIONES APRENDIDAS

Vencer ese último escollo teórico me supuso muchos meses de días agotadores y noches en vela. Varias veces estuve a punto de darme por vencido. En un momento especialmente oscuro, le dije a mi madre que no estaba seguro de querer despertarme a la mañana siguiente. Ella me respondió de una manera típicamente griega: «Si haces alguna tontería, cojo un avión y te estrangulo con mis propias manos». Perdido en un mundo de pensamiento hiperanalítico, necesitaba una frase así de absurda para reaccionar. Terminé la demostración en noviembre de 2009. La compartí con Matt, que añadió rápidamente un apartado sobre cómo ampliar el resultado para explicar el efecto Hall cuántico fraccionario, y la subimos a Internet. Pasaron cinco años hasta que conseguimos publicar el resultado, y otros cuatro antes de que la comunidad de físicos matemáticos fuera capaz de digerirlo. El 25 de febrero de 2018 abrí un correo electrónico de Michael Aizenman que llevaba esperando ocho años. Decía:

Queridos Matt y Spiros:

He actualizado la página web «Problemas abiertos en física matemática» para reflejar que la cuestión sobre el efecto Hall cuántico entero, publicada por Yosi Avron y Ruedi Seiler, ha sido resuelta en vuestro trabajo conjunto.

Aprovecho para agradeceros vuestra contribución y felicitaros por ella. Es un placer comprobar que en los dos problemas donde se han producido progresos, estos han llegado gracias a ideas innovadoras y nuevos métodos. La lista de los que habéis conseguido resolverlos constituye un verdadero cuadro de honor.

La pregunta fundamental de la que habíamos partido era por qué un fenómeno cuántico microscópico se manifestaba a escalas macroscópicas. En cambio, lo que descubrimos fue que una de las constantes fundamentales de la naturaleza reflejaba un orden global más allá de nuestra comprensión finita: lo infinito en comunión con lo infinitesimal. Y aunque nos hayamos centrado en la teoría tras el efecto Hall cuántico, los esfuerzos experimentales que ha inspirado este fenómeno en las tres últimas décadas han sido igual de emocionantes, si no más. La investigación de las fases topológicas de la materia más allá de los sistemas bidimensionales del efecto Hall cuántico está allanando el camino hacía técnicas como la computación cuántica a gran escala tolerante a los fallos. Los impresionantes resultados obtenidos por laboratorios como el de Ana María Rey, en la Universidad de Colorado en Boulder, llegan a abordar cuestiones fundamentales sobre la propia naturaleza del tiempo.

Esta experiencia también me ha enseñado una valiosa lección: mi autoestima no depende de mi éxito en la vida. La crucial conversación con mi madre tuvo lugar tres meses antes de darle los toques finales a la solución. No es que me convirtiera en un genio de las matemáticas durante esos meses: logré avanzar dividiendo el problema en partes sencillas que era capaz de comprender. Y para hacer eso, tuve que aceptar el hecho de sentirme un incompetente la mayor parte del tiempo. Sin la confianza que mis padres depositaron en mí como persona, fuera o no lo bastante bueno para resolver el problema, me habría dado por vencido antes de llegar a la meta. Y de haberlo hecho, puede que el problema siguiese sin resolver y los Vengadores de Marvel tuvieran que haber buscado una manera aún más inverosímil de salvar el universo que saltar al reino cuántico a través de un portal macroscópico.

PARA SABER MÁS

A topological look at the quantum Hall effect. Joseph E. Avron, Daniel Osadchy y Ruedi Seiler en *Physics Today*, vol. 56, n.º 8, págs. 38-42, agosto de 2003.

Quantization of Hall conductance for interacting electrons on a torus. Matthew B. Hastings y Spyridon Michalakis en *Communications in Mathematical Physics*, vol. 334, págs. 433-471, febrero de 2015.

Why is the Hall conductance quantized? Spyridon Michalakis en *Nature Reviews Physics*, vol. 2, págs. 392-393, agosto de 2020.

Página web de «Problemas abiertos en física matemática»: **http://web.math.princeton.edu/~aizenman/OpenProblems_MathPhys**

EN NUESTRO ARCHIVO

El efecto Hall cuántico. Klaus von Klitzing en *IyC*, mayo de 1986.

Efectos cuánticos macroscópicos. Markus Aspelmeyer y Markus Arndt en *IyC*, marzo de 2013.

Aislantes topológicos. David Carpentier y Laurent Lévy en *IyC*, agosto de 2015.

Un raudal de materiales topológicos. Maia G. Vergniory y Barry Bradlyn en *IyC*, septiembre de 2019.



BENEFICIOS SOCIALES DE LA SINCRONÍA

Las actividades sincronizadas como el baile y el ejercicio en grupo generan vínculos sociales muy fuertes, seguramente a través de cambios en la química cerebral

Marta Zaraska

LOS ESTUDIANTES de una escuela de artes marciales en China practican sus movimientos al unísono.


OS
A

Marta Zaraska es redactora científica y autora de *Growing young: How friendship, optimism and kindness can help you live to 100* (Penguin Random House, 2020).



Para salvar a cualquier miembro de su banda de música, Steve Marx no dudaría en lanzarse al tráfico de una autopista. Una afirmación así es más propia de antiguos compañeros del ejército que de músicos, pero Marx la utiliza para mostrar la intensidad de sus sentimientos hacia ese grupo. El director de la banda del Colegio de Gettysburg lleva más de veinte años formando parte de agrupaciones musicales, desde que iba al instituto, y afirma que «se crea un vínculo muy fuerte. Es como una familia». Todos van con sus uniformes a juego, instrumento en mano y marchando en perfecta armonía, ahora la pierna izquierda, luego la derecha, con movimientos y sonidos tan perfectamente sincronizados que los individuos se diluyen en el grupo. Lo que le cautiva no es tanto la música, admite. Para él, marchar tiene que ver sobre todo con la sensación de parentesco.

Muchas actividades grupales potencian nuestro sentimiento de pertenencia, pero las investigaciones muestran que hacer cosas de manera sincronizada puede generar vínculos sociales aún más fuertes y una mayor sensación de bienestar. Participar en un equipo de remo, bailar en grupo, cantar en un coro o simplemente tamborilear con los dedos de forma acompasada aumenta la generosidad, la confianza y la tolerancia hacia los demás, a menudo en mayor medida que las actividades más desordenadas. Incluso puede elevar nuestro umbral del dolor. Según Laura Cirelli, psicóloga de la Universidad de Toronto que investiga la sincronía, aún estamos empezando a comprender por qué los movimientos coordinados simultáneos aportan esa dosis extra de afinidad. Los potentes efectos que causan en nosotros responden a una combinación de factores neurohormonales, cognitivos y perceptivos. «Es una interacción compleja», señala Cirelli. También hay indicios de que tenemos una propensión a la sincronía que podría haber sido seleccionada en el curso de la evolución humana, en parte porque nos permite establecer vínculos con muchas personas al mismo tiempo, lo cual supone una ventaja para la supervivencia.

Los humanos no somos los únicos capaces de llevar a cabo actividades sincronizadas. Ciertos animales también lo hacen. Por ejemplo, los delfines mulares surcan el agua al unísono, y los machos de algunas especies de luciérnaga armonizan sus destellos. Los expertos en comportamiento animal sostienen que, igual que ocurre en los humanos, esas conductas coordinadas promueven diversos beneficios sociales, como el atraer a una posible pareja. Lo que nos distingue es que nuestra sincronía se manifiesta en una gran variedad de comportamientos, algunos de ellos organizados (grupos de oración, coros, desfiles militares o *flashmobs*) y otros espontáneos, como cuando los asistentes a un concierto dan palmas al ritmo de la música o una pareja que pasea por el parque acompasa sus pisadas. Algunos estudios han demostrado que dos personas que se sientan en mecedoras contiguas comenzarán a balancearse en paralelo de forma natural.

Marx atribuye su devoción por sus compañeros de banda a la sincronía, y los experimentos psicológicos han demostrado que esta clase de coordinación favorece los sentimientos de grupo. En un estudio, un equipo de la Universidad de Oxford separó a un conjunto de jóvenes colegiales en dos grupos, asignándoles petos naranjas o verdes. Esa vestimenta podía provocar divisiones entre los niños, pero los experimentadores les pidieron que bailaran juntos un rato de manera sincronizada. Eso hizo que los pequeños vestidos de verde y los de naranja estuvieran más unidos y jugaran más cerca unos de otros, en comparación con otros niños sometidos a una separación similar pero que bailaron descoordinados.

MAYOR AFINIDAD

Y no pasa solo con los juegos de los niños. Una serie de experimentos realizados en Hungría y publicados en 2019 sugieren que caminar de forma sincronizada con una persona de una minoría étnica puede reducir los prejuicios. En Hungría siguen siendo habituales los estereotipos negativos sobre los gitanos. Cuando los investigadores pidieron a sujetos no romaníes que asignaran palabras positivas o negativas a imágenes de gitanos

EN SÍNTESIS

Las actividades sincronizadas, como participar en un equipo de remo, bailar en grupo o tamborilear con los dedos de forma acompasada, aumentan nuestra generosidad, confianza y tolerancia hacia los demás.

Esos efectos de la sincronía responden a factores neurohormonales, cognitivos y perceptivos, y se relacionan con la liberación de endorfinas y la activación de las áreas de recompensa del cerebro.

Nuestra propensión a la sincronía nos permite establecer vínculos con muchas personas a la vez y crear grupos más grandes, lo cual pudo desempeñar un papel importante en la evolución humana.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES



LOS PARTICIPANTES en un baile tradicional zulú conocido como *ingoma,* en Sudáfrica, se mueven como un grupo.

RAJESH JANTILAL, GETTY IMAGES

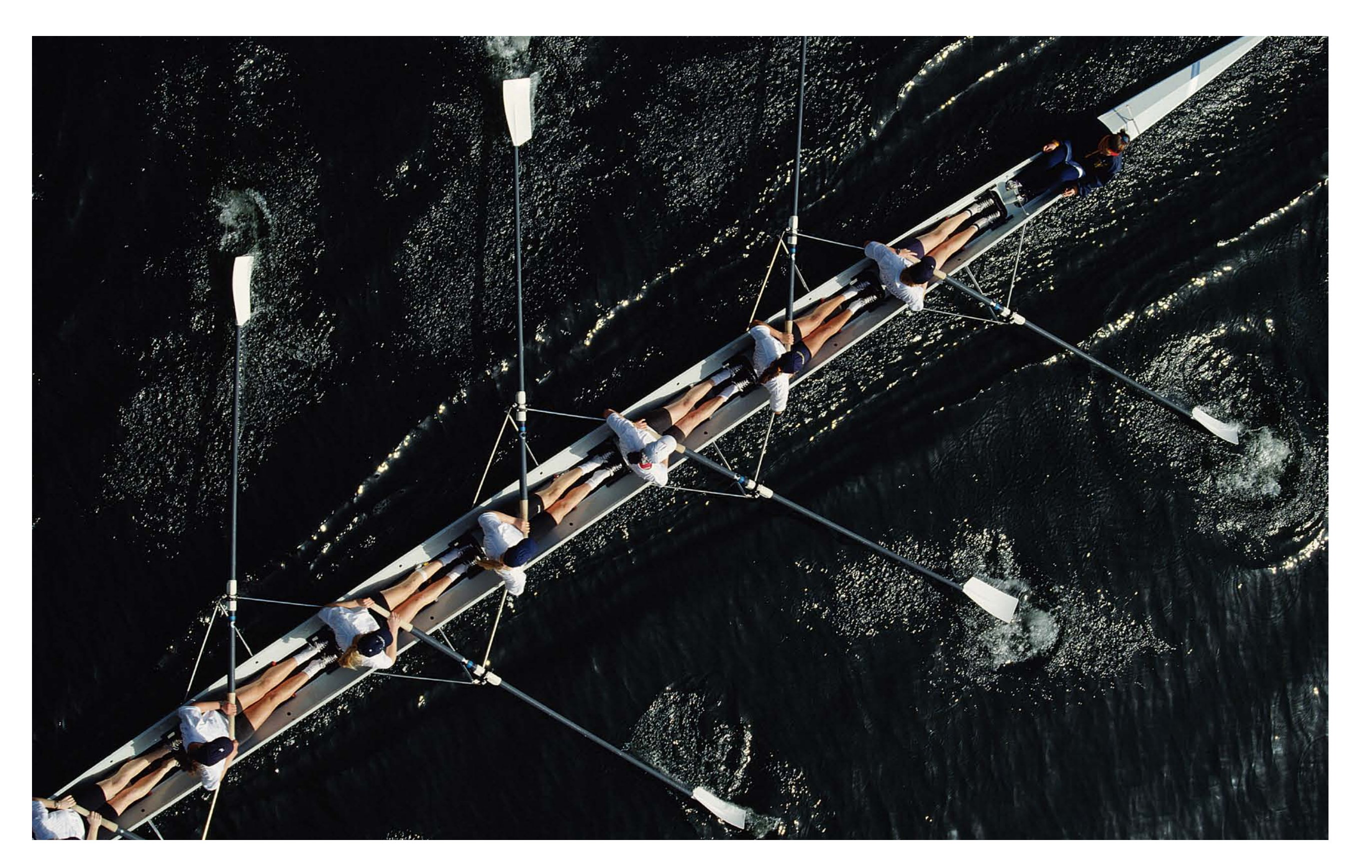
vestidos de forma tradicional, emplearon más palabras negativas. Cuando el mismo grupo contempló imágenes de húngaros con el traje tradicional, usó más palabras positivas. A continuación, los investigadores pidieron a los sujetos que dieran vueltas alrededor de una gran sala, de manera tanto síncrona como asíncrona, junto a alguien a quien presentaron como gitano. Más tarde, cuando los investigadores preguntaron a los voluntarios sobre sus sentimientos hacia los gitanos, aquellos que caminaron en sincronía mostraron más cercanía y un mayor deseo de ver de nuevo a sus compañeros de paseo.

Los científicos desconocen cuánto duran esos efectos, así que quizás la coordinación no constituya una solución permanente contra la hostilidad. No obstante, sí que parece minimizar los prejuicios en ciertas situaciones, y una posible razón es que sencillamente consigue que los otros nos gusten más. En un estudio publicado en 2009 en *Social Cognition*, los participantes tamborileaban con sus dedos al ritmo de un metrónomo, y en algunos casos se unía a ellos uno de los experimentadores, que seguía el mismo ritmo u otro diferente. Los resultados demostraron que los voluntarios coordinados con el investigador luego se mostraban más inclinados a decir que este les parecía simpático.

Esos sentimientos de afinidad se traducen en comportamientos más positivos hacia los demás. El tamborileo sincrónico con los dedos, por ejemplo, puede hacer que la gente sea más generosa a la hora de donar dinero. En una serie de experimentos publicados en 2017 en *Basic and Applied Social Psychology*, los investigadores dividieron a los voluntarios en grupos de seis, que a continuación separaron en subgrupos de tres. Tras trabajar brevemente en una actividad grupal, los sujetos tuvieron que enfrentarse a diversos escenarios para repartir un dinero entre ellos y decidir a quién se lo darían. Los que habían pasado tiempo tamborileando los dedos de forma sincrónica solo con su trío se mostraban más dispuestos a donar dinero a esas personas. Pero cuando dos tríos habían tamborileado acompasadamente, formando un grupo de seis durante algunos minutos, sus miembros eran más propensos a dar dinero a los seis compañeros. Mientras, el tamborileo asíncrono no aumentó la generosidad. En 2017, un metaanálisis de 42 estudios confirmó que las actividades sincronizadas, desde correr hasta balancearse en una mecedora al mismo ritmo, fomentan las conductas prosociales.

Los psicólogos y neurocientíficos explican el modo en que la sincronía acerca a las personas mediante un término bastante aséptico: difuminación del yo-otro. «Los límites entre nosotros y los demás se desdibujan. Cuando nos acompasamos con las acciones de otras personas, sea o no de forma consciente, las integramos con las nuestras», señala Ivana Konvalinka, neurocientífica cognitiva de la Universidad Técnica de Dinamarca.

Hasta los niños muy pequeños tienden a ser más colaboradores tras tomar parte en actividades sincrónicas. Por supuesto, no es posible pedirle a un bebé que actúe de manera coordinada, así que los investigadores han ideado maneras creativas de examinar el fenómeno. En un estudio publicado en 2017 en *Music Perception*, una persona llevaba a un bebé de 14 meses pegado al pecho en una mochila portabebés y otra persona estaba frente a ellos. Los dos adultos comenzaban a dar saltos, a veces en perfecta sincronía y otras no, y eso hacía que los bebés también saltaran. Los psicólogos realizaron una serie de experimentos usando este diseño. Después de una sesión de saltos al unísono, si el segundo adulto dejaba caer una pelota u otro objeto, los bebés se mostraban bastante dispuestos a recogerlo y devolvérselo. Mientras, aquellos bebés que no saltaron en sincronía no fueron tan serviciales. El hecho de que los efectos de la sincronía se manifiesten en niños tan pequeños sugiere que este comportamiento es importante para la especie, explica la antropóloga cognitiva Emma Cohen, de la Universidad de Oxford. «Si algo surge en las



LOS REMEROS que se entrenan de manera sincronizada presentan concentraciones más altas de endorfinas, unas sustancias químicas del cerebro que mitigan el dolor.

primeras etapas de la vida, es probable que sea automático y fundamental para nosotros como humanos», señala. Podría incluso haber desempeñado un papel importante en nuestra evolución.

EVOLUCIÓN AL UNÍSONO

El psicólogo de la Universidad de Oxford Robin Dunbar cree que la sincronía podría haber fomentado los vínculos de grupo de los primeros humanos a medida que sus poblaciones iban creciendo, al favorecer las conductas prosociales y la cooperación. Dunbar lleva años investigando la sincronía, y su fascinación comenzó en una conferencia sobre arqueología de la música. Una de las sesiones vespertinas fue muy poco habitual: un músico de Sudáfrica invitó a Dunbar y otros asistentes a participar en algo semejante a un baile tradicional zulú. Les pidió que se pusieran en círculo, les dio unas flautas de plástico de diversas longitudes, y les animó a que las soplaran produciendo un sonido aleatorio y empezaran a caminar alrededor del círculo. Al principio el ruido era horrible, relata Dunbar, pero en pocos minutos el sonido y los movimientos cambiaron sin necesidad de realizar ningún esfuerzo concreto: los científicos se sincronizaron, tocando música en sintonía con los demás. «Todos experimentamos esa sensación de pertenencia, de formar parte del grupo», rememora Dunbar. «Comprendí que se trataba de un efecto extraordinario.»

Dunbar postula que, en la evolución humana, la sincronía pudo potenciar el acicalamiento como mecanismo importante para crear vínculos. Los primates no humanos se acicalan entre sí para quitarse las pulgas y otros parásitos, y eso promueve la cohesión del grupo. Esa actividad requiere una gran cantidad de tiempo y esfuerzo a medida que aumenta el número de individuos a acicalar, y Dunbar sostiene que eso establece un límite superior para el tamaño de un grupo estrechamente unido. Cuando representó en un gráfico el tiempo que pasaban acicalándose varias especies de primates frente al tamaño típico de sus grupos, descubrió que ambas cantidades guardaban una relación directa y que el límite superior correspondía a un grupo de 50 primates. Ninguna especie de monos o simios forma grupos más grandes (en promedio), pero los humanos sí lo hacen: Dunbar calculó que, para nosotros, una comunidad natural consta de unas 150 personas. Obtuvo esa cifra basándose en el tamaño de la neocorteza humana en comparación con la de los demás primates, y también en el número de habitantes de los pueblos en las sociedades pequeñas y en la cantidad de amigos y familiares que suele tener la gente en las sociedades más grandes [*véase* «Máximo de amigos», por Mark Fischetti; Investigación y Ciencia, septiembre de 2018]. Los registros históricos también confirman la cifra: era el tamaño medio de una aldea inglesa en el año 1086, cuando Guillermo el Conquistador encargó una especie de censo de su nuevo reino. (No todo el mundo está de acuerdo en que 150 sea un número definitivo; algunos científicos sostienen que se basa en datos demasiado selectivos.)

De acuerdo con Dunbar, una posible razón por la que los primeros humanos lograron mantener grupos tres veces más grandes que los del resto de simios es que concibieron una forma de «acicalar» a varios individuos a la vez, usando las voces o los movimientos corporales en vez de coger parásitos con los dedos. Dunbar sostiene que el mayor tamaño ofrecía a los grupos protección contra los ataques de otros humanos, lo que incrementó su capacidad para sobrevivir y reproducirse, y propició la selección natural de la propensión a la sincronía en las generaciones futuras.

HARALD SUND, GETTY IMAGES

La adopción de ese comportamiento a menudo cuenta con un respaldo biológico. En los primates no humanos, el acicalamiento libera unas sustancias neuroquímicas llamadas endorfinas, lo cual parece aumentar los sentimientos positivos, señala Dunbar. Y los estudios apuntan a que las endorfinas, producidas por el cuerpo para reforzar el placer y aliviar el dolor, podrían formar parte de los mecanismos que permitieron que el canto y el baile reemplazaran al clásico acicalamiento en los vínculos humanos. Algunos investigadores las han denominado el «pegamento neuroquímico» de las relaciones humanas.

CEREBRO Y MOVIMIENTO

Varios experimentos, algunos de ellos a cargo del equipo de Dunbar, han puesto de manifiesto un sentimiento de vinculación y compromiso inducido por las endorfinas. Uno de los primeros estudios demostró no solo que los comportamientos síncronos tienden a activar los sistemas de endorfinas, sino también que los efectos van más allá de los producidos por la propia actividad física (la famosa «euforia del corredor»). En uno de los estudios de Dunbar, se invitó a varios integrantes del equipo masculino de remo de la Universidad de Oxford a entrenar en máquinas de remo tanto de manera independiente como en sincronía. Tras el ejercicio, los investigadores midieron cuánto dolor podía aguantar cada remero inflando el brazalete de un tensiómetro hasta que la molestia se tornaba insoportable. (Medir directamente los niveles de endorfinas no es fácil, por lo que es habitual recurrir a la percepción del dolor como aproximación.) Dunbar y sus colaboradores hallaron que los atletas que se ejercitaban en sincronía con los demás después eran mucho más resistentes al dolor, y los científicos calcularon que su producción de endorfinas se duplicó.

Una serie de experimentos similares centrados en la danza mostraron que la sincronía potencia mucho más la liberación de las endorfinas que los movimientos disonantes. Los voluntarios empezaron aprendiendo algunos movimientos básicos de baile, como «conducir» (se extiende una mano como si estuviera apoyada en un volante y se gira de izquierda a derecha, y viceversa, mientras la otra mano descansa relajada junto al cuerpo) o «nadar» (se doblan las rodillas rítmicamente y se mueven los brazos de manera alternativa, como si estuviéramos nadando a crol). Luego los participantes pasaron a la pista de baile en grupos de cuatro y recibieron auriculares para escuchar la música. El truco estaba en que, en algunos grupos, a los cuatro voluntarios se les puso exactamente la misma música y se les pidió que llevaran a cabo la misma rutina de movimientos, con lo que apareció la sincronía. Mientras, los miembros de otros cuartetos escuchaban canciones distintas o debían realizar rutinas diferentes, lo cual dio lugar a una extraña y discordante discoteca silenciosa. Tras acabar de bailar, se midió el umbral del dolor con tensiómetros. Una vez más, quienes habían tomado parte en un movimiento sincrónico mostraron mayor resistencia, confirmando que el efecto no surge solo por bailar con otros, sino por hacerlo en sincronía. Los científicos que condujeron los experimentos, publicados en 2016 en *Evolution and Human Behavior*, también comprobaron los vínculos entre los sujetos. Al igual que en otros estudios sobre reacciones emocionales, aquellos que bailaron acompasados afirmaron sentirse más cercanos a los demás participantes que quienes se movieron por separado.

Aunque las endorfinas ofrecen una explicación neuroquímica para los potentes efectos de la sincronía, puede que también intervengan otros mecanismos biológicos. Si nos fijamos en los patrones de actividad cerebral, la sincronía parece tener repercusiones distintas a las que resultan de tararear o contonearse sin ninguna armonía. Un estudio de 2020 mediante espectroscopía funcional de infrarrojo cercano (una técnica no invasiva que mide el oxígeno que está usando una región cerebral concreta, lo que indica cuánto está trabajando) demostró que los movimientos asíncronos activan principalmente el hemisferio izquierdo del cerebro, mientras que la sincronía conlleva la activación de ambos hemisferios. Eso sugiere que la sincronía constituye un comportamiento mucho más elaborado que los movimientos sencillos.

RECOMPENSAS COORDINADAS

Otra investigación sugiere que el sistema de recompensa del cerebro, incluidas las estructuras neuronales implicadas en el deseo y la motivación, también contribuye al poder de la sincronía, al crear un bucle de retroalimentación positiva. Como revelaron una serie de experimentos basados en imágenes obtenidas por resonancia magnética funcional (otra forma de evaluar la actividad cerebral), cuando aquellos con facilidad para tocar el tambor lo hacen en sincronía, aumenta la actividad del núcleo caudado derecho, una zona cerebral relacionada con la recompensa. Y eso, a su vez, hace que sean más propensos a ayudar a la persona con la que han tocado. «Creemos que la actividad del núcleo caudado que se observa al tocar el tambor de manera coordinada refleja la naturaleza gratificante de la experiencia», señala Christian Keysers, investigador del Instituto de Neurociencia de los Países Bajos y principal autor del estudio. «Y los participantes tendrán más probabilidades de realizar otras actividades con esa persona en el futuro.» Cuando nos sincronizamos, se activan las áreas de recompensa del cerebro y eso nos hace más proclives a ayudar a nuestros compañeros.

Aunque no todo el mundo siente los efectos de la sincronía con la misma intensidad, la experiencia de moverse de manera acompasada con los demás o de cantar al unísono parece jugar un papel importante en las sociedades humanas. Probablemente esa es la razón por la que vemos sincronía por todas partes: en los conciertos sinfónicos, en los bailes o en las ceremonias de los pueblos indígenas. Cuando estamos sincronizados, las hormonas y la actividad cerebral nos ayudan a suavizar las fricciones sociales, manteniéndonos unidos. Participar en una banda de música quizás no nos lleve a la paz mundial, pero ese tipo de comportamientos pueden ayudarnos a ser más tolerantes y más capaces de pensar en el bien común en comunidades más amplias. IyC

PARA SABER MÁS

Keeping together in time: Dance and drill in human history. William Hardy McNeill. Harvard University Press, 2009.

To be in synchrony or not? A meta-analysis of synchrony's effects on behavior, perception, cognition and affect. Reneeta Mogan, Ronald Fischer y Joseph A. Bulbulia en *Journal of Experimental Social Psychology*, vol. 72, págs. 13-20, septiembre de 2017.

How moving together binds us together: The social consequences of interpersonal entrainment and group processes. Liam Cross, Martine Turgeon y Gray Atherton en *Open Psychology*, vol. 1, n.° 1, págs. 273-302, julio de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Psicología de la cooperación. Natalie Sebanz en *MyC*, n.° 24, 2007.

Neurociencia de la danza. Steven Brown y Lawrence M. Parsons en *IyC*, septiembre de 2008.

Claves psicosociales del baile. Gunter Kreutz en *MyC*, n.° 69, 2014.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Cómo conseguir una buena ventilación

Renovar el aire de las estancias cerradas se ha demostrado eficaz para limitar la propagación de la COVID-19. ¿Cuándo y durante cuánto tiempo debemos ventilar?

Renovar el aire en los espacios cerrados: esta cuestión ha irrumpido en el debate público con motivo de la pandemia de COVID-19. Sabemos que el coronavirus SARS-CoV-2 se transmite por vía aérea, lo que ha dado lugar a todo tipo de recomendaciones para ventilar adecuadamente las estancias a fin de controlar su propagación. Más allá de la crisis epidémica, una buena ventilación reviste importancia para la salud y el bienestar general. Pero, ¿cómo podemos saber si una habitación está bien aireada?

La respuesta pasa por medir los niveles de dióxido de carbono. Este compuesto

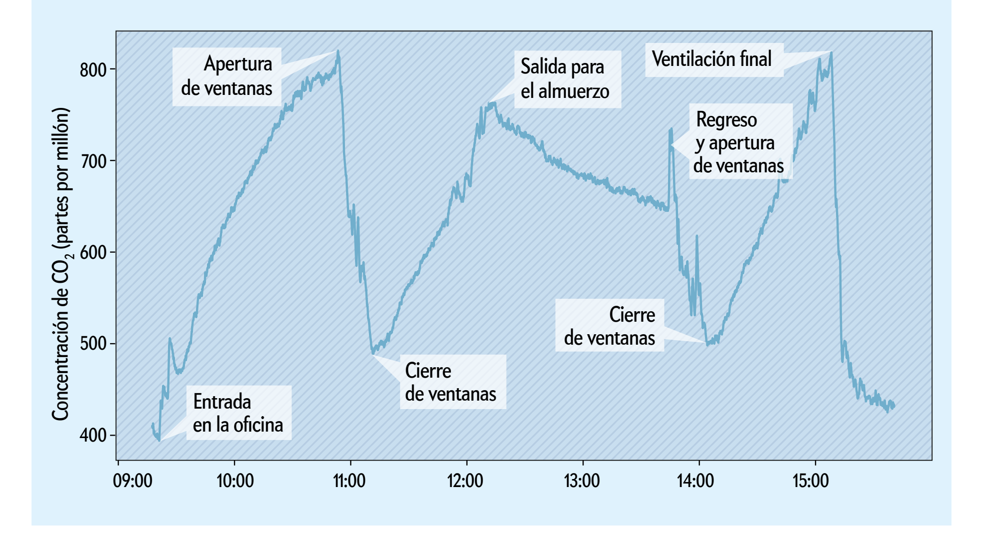
EN UN ESPACIO CERRADO, la respiración de las personas allí presentes puede hacer que la concentración de dióxido de carbono (CO_2) aumente con rapidez. Para mantenerla por debajo de las 1500 partes por millón (ppm) en una habitación con unos 10 metros cúbicos de aire por persona, este debe renovarse aproximadamente cada media hora. Para lograrlo, suele bastar abrir las ventanas de par en par durante unos minutos.

es un producto de nuestra respiración, por lo que medir su concentración nos permite estimar la calidad del aire que inhalamos.

En el exterior, la concentración media de CO_2 ronda el 0,04 por ciento. En otras palabras: una de cada 2500 moléculas presentes en el aire es de CO_2. Para evitar tener que trabajar con cifras decimales, suelen usarse las partes por millón (ppm). En este caso, hablamos de una concentración de unas 400 ppm, donde, en las ciudades, pueden darse variaciones de unas pocas decenas debido a la contaminación o a la situación meteorológica.

CAMBIOS RÁPIDOS

LA CONCENTRACIÓN DE CO_2 en una habitación cerrada puede aumentar con rapidez. Se estima que, a presión atmosférica, un adulto exhala por hora unos 18 litros de este gas. No obstante, abrir las ventanas permite regresar a los valores normales en muy poco tiempo. Esta gráfica ilustra la evolución temporal de la concentración de CO_2 en la oficina de uno de los autores (Courty) desde por la mañana hasta primera hora de la tarde.



No superar las 1000 ppm

Cuando nos encontramos en el exterior, el aire que exhalamos se diluye con rapidez en la inmensidad de la atmósfera, por lo que nuestra respiración no ejerce ningún efecto sobre la concentración exterior de CO_2. No ocurre así en un espacio cerrado. En el aire exhalado, la concentración de CO_2 alcanza el 4 por ciento; es decir, unas 40.000 ppm. Se estima que, durante la respiración normal y a presión atmosférica, un adulto libera unos 18 litros de CO_2 por hora. Por tanto, en un espacio cerrado y sin ventilar, la concentración de CO_2 aumentará de manera gradual.

Para fijar ideas, consideremos una habitación en la que cada persona disponga de 10 metros cúbicos de aire; es decir, 10.000 litros. Esto corresponde, por ejemplo, a 5 personas en una sala de 20 metros cuadrados y 2,5 metros de altura. Si la habitación es hermética y no está ventilada, la concentración de CO_2 aumentará linealmente con el tiempo. Pasada una hora se añadirán 18 litros de CO_2 a los 10 metros cúbicos de aire por persona. Como consecuencia, la concentración aumentará en 1800 ppm y alcanzará las 2200 ppm si el aire de la habitación tenía inicialmente la misma composición que el aire exterior.

Varios estudios han demostrado que, cuando la concentración de CO_2 supera las 2000 ppm, nuestras facultades cognitivas comienzan a deteriorarse, especialmente cuando acometemos tareas complejas como reflexionar, tomar decisiones, etcétera. Debido a ello, los valores máximos recomendados para la concentración de CO_2 en interiores suelen establecerse entre las 1000 y las 1500 ppm, en particular en viviendas y oficinas.

¿Cómo proceder para no superar estos umbrales? Una solución pasa por la ventilación mecánica. La norma europea para la ventilación en locales no residenciales (EN 13779) recomienda un flujo de 29 metros cúbicos por hora y por persona para lograr una calidad del aire «moderada». ¿De dónde procede esta cifra?

Tras una fase transitoria en la que varía, la cantidad de CO_2 se estabiliza una vez que el dióxido de carbono producido por la respiración se evacúa a través de la ventilación. Si suponemos que la mezcla de gases presentes en el aire es homogénea, esta cantidad evacuada no es otra que el producto del flujo de la ventilación y la concentración de CO_2. Puede verse que, al alcanzar el régimen estacionario, la concentración de CO_2 viene dada por la suma de la concentración atmosférica (400 ppm) y la relación entre el flujo producido y el evacuado. De esta manera, 18 litros de CO_2 por hora (producidos durante la respiración) sobre 29 metros cúbicos de aire por hora (la tasa de ventilación aludida arriba) nos proporciona 620 ppm adicionales de CO_2, lo que da como resultado una concentración de 1020 ppm.

Esta cifra es aceptable, pero comienza a rondar los máximos recomendados. Cabe señalar también que este resultado (y, por tanto, las condiciones que ha de satisfacer un sistema de ventilación) no depende del volumen del local, sino solo del número de ocupantes. El cumplimiento de la norma requiere, en consecuencia, una estimación del aforo de las estancias.

Ventilar unos minutos cada media hora

Si no disponemos de ventilación mecánica, tendremos que recurrir a la natural. Volviendo a nuestro ejemplo de 10 metros cúbicos de aire por persona, hallamos que la concentración de CO_2 alcanzará las 1300 ppm tras media hora, lo que nos obligará a abrir las ventanas para renovar el aire. A este proceso contribuyen varios factores. Uno de ellos es, por supuesto, el viento. Pero también influye la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior: esta afecta a la densidad del aire y a los movimientos de convección causados por el flujo que circula a través de las ventanas.

No obstante, los flujos correspondientes resultan mucho más difíciles de estimar. Al igualar la fuerza ascendente del aire caliente con la fricción aerodinámica del aire ambiental, obtenemos velocidades del orden de 0,5 metros por segundo para diferencias de temperatura de 10 grados centígrados. Suponiendo que la mitad

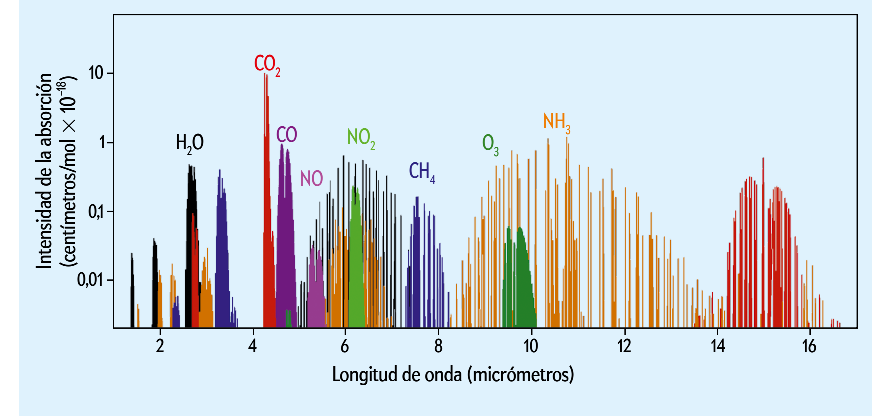
de la superficie de las ventanas —unos 4 metros cuadrados para nuestra sala de 20 metros cuadrados, pongamos por caso— se utiliza para introducir aire del exterior mientras que la otra mitad se usa para expulsar aire viciado, renovaríamos completamente los 50 metros cúbicos de aire de la sala en 50 segundos gracias a un fenomenal flujo de 3600 metros cúbicos por hora.

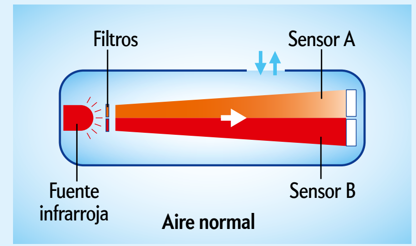
Aunque esta estimación del flujo es algo elevada y el tiempo demasiado corto, las cifras dejan claro lo que todos hemos podido verificar en múltiples ocasiones: que la convección natural basta para renovar el aire de una habitación en apenas unos minutos. Este tiempo es lo suficientemente corto para evitar el enfriamiento de los muebles y las paredes durante el invierno, y el confort térmico solo se ve perturbado por unos momentos. Con todo, hemos de tener en cuenta que aquí hemos supuesto que la convección de aire es posible. Sin viento y sin una diferencia apreciable de temperatura, habremos de dejar las ventanas permanentemente abiertas para ventilar.

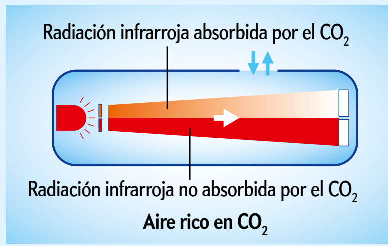
MEDICIÓN CON INFRARROJOS

LA MOLÉCULA DE CO_2 presenta un pico de absorción en luz infrarroja de 4,3 micrómetros de longitud de onda. Dicho valor se encuentra claramente separado de las bandas típicas de absorción de otros gases presentes en el aire (*arriba*), por lo que proporciona una manera sencilla de medir la concentración de CO_2.

Los detectores de CO_2 basados en la espectroscopia infrarroja no dispersiva (NDIR, *abajo*) cuentan con dos sensores: uno que opera en la longitud de onda del pico de absorción del CO_2 (*A*) y otro que detecta las frecuencias no absorbidas (*B*). La señal del primero depende, por tanto, de la cantidad de CO_2 presente en el aire a través del cual pasa la luz infrarroja, mientras que la del segundo es independiente de dicha concentración. La comparación entre las lecturas de ambos sensores permite inferir la concentración de CO_2. A diferencia de otros dispositivos, los detectores NDIR no requieren una recalibración regular y permanecen operativos durante varios años.







ADAPTADO DE: «TOWARDS INTEGRATED MID-INFRARED GAS SENSORS», DANIEL POPA Y FLORIN UDREA EN *SENSORS*, VOL. 19, PÁG. 2076, MAYO DE 2019 (*gráfica*); BRUNO VACARO (*detector*)

Medir la concentración de CO_2

Dejando a un lado nuestras estimaciones sobre la eficacia de la ventilación, ¿cómo podemos asegurarnos de que la renovación del aire es suficiente? En la industria de la construcción, una prueba estándar consiste en medir la concentración interior de CO_2. Y si bien hay dispositivos para uso profesional, hoy en día existen en el mercado sensores económicos que pueden controlarse con una placa Arduino. Estos dispositivos, conocidos como NDIR por el acrónimo inglés de «espectroscopia infrarroja no dispersiva», miden la absorción de luz infrarroja por parte de las moléculas de aire.

El CO_2 absorbe la radiación infrarroja con una longitud de onda de 4,3 micrómetros, la cual excita los modos de vibración de los enlaces entre el carbono y el oxígeno. Este valor se aleja de las bandas espectrales de absorción de otras moléculas presentes en el aire, como la de oxígeno, monóxido de carbono o agua. Medir esta línea de absorción constituye, por tanto, una técnica muy selectiva.

Con una concentración de CO_2 de 400 ppm, la intensidad de la radiación electromagnética de unos 4 micrómetros de longitud de onda disminuye un 2 por ciento tras haber recorrido 5 centímetros. Puede que esto no parezca gran cosa, pero basta para construir un pequeño dispositivo de medición.

Los detectores NDIR de buena calidad realizan mediciones diferenciales. Constan de una fuente que emite en el infrarrojo y de dos sensores: uno que detecta las longitudes de onda no absorbidas por el CO_2 y que sirve como referencia, y otro sensible a la radiación de onda de 4,3 micrómetros que absorbe el CO_2. Como consecuencia, la intensidad recibida por el segundo sensor variará con la concentración de CO_2, y la diferencia de su lectura con la del primero nos permitirá determinar la concentración del gas. Con un dispositivo de este tipo, asequible por unas decenas de euros, todo el mundo puede comprobar si el aire que respira se renueva como es debido.

PARA SABER MÁS

The fluid mechanics of natural ventilation. P. F. Linden en *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 31, págs. 201-238, enero de 1999.

Optical gas sensing: A review. Jane Hodgkinson y Ralph P. Tatam en *Measurement Science and Technology*, vol. 24, art. 012004, noviembre de 2012.

Is CO_2 an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO_2 concentrations on human decision-making performance. Usha Satish et al. en *Environmental Health Perspectives*, vol. 120, págs. 1671-1677, diciembre de 2012.

Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19. Rajesh K. Bhagat et al. en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 903, art. F1, septiembre de 2020.

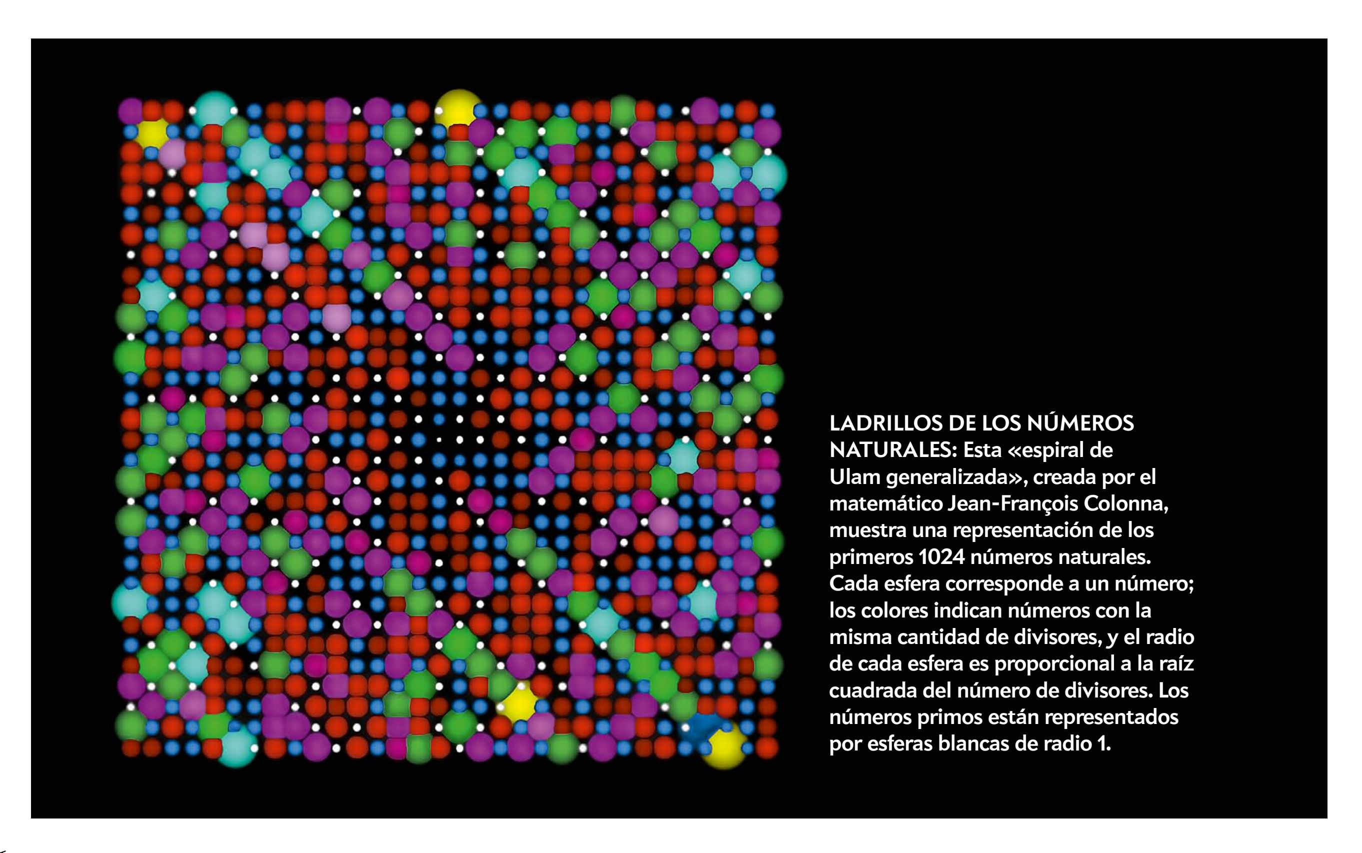
por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



La hipótesis de Riemann (I)

Caos en los números primos



LADRILLOS DE LOS NÚMEROS NATURALES: Esta «espiral de Ulam generalizada», creada por el matemático Jean-François Colonna, muestra una representación de los primeros 1024 números naturales. Cada esfera corresponde a un número; los colores indican números con la misma cantidad de divisores, y el radio de cada esfera es proporcional a la raíz cuadrada del número de divisores. Los números primos están representados por esferas blancas de radio 1.

Los matemáticos han intentado en vano hasta hoy descubrir un orden en la secuencia de los números primos, y tenemos razones para creer que esto es un misterio que no podrá nunca penetrar la mente humana.
—Leonhard Euler (1707-1783)

Puede que Dios no juegue a los dados con el universo, pero algo extraño pasa con los números primos.
—Paul Erdös (1913-1996)

En la película *Contact* (1997), adaptación de la novela homónima de Carl Sagan, Ellie Arroway y su equipo captan con radiotelescopios una señal procedente de la estrella Vega. Cuando descubren que la señal repite una y otra vez la secuencia 2, 3, 5, 7, 11, ... Arroway exclama emocionada: «¡Todos son números primos! ¡Es imposible que se trate de un fenómeno natural!».

¿Por qué Sagan apostó por los números primos como prueba inequívoca de inteligencia extraterrestre? Un número primo es un número natural que solo es divisible por 1 y por él mismo. De modo que 2, 3, 5, 7 y 11 son todos primos, como exclamó la doctora Arroway. Y del mismo modo que podemos clasificar los números naturales en dos grupos como pares e impares, podemos también clasificarlos en primos y compuestos. Lo interesante de esta segregación es que los números compuestos pueden «descomponerse» en primos. El número 132, por ejemplo, puede expresarse como $2 \times 2 \times 3 \times 11$. Y es más, no existe otra colección de primos distinta cuyo producto dé el mismo resultado.

Sabemos que esto ocurre para todos los números naturales gracias al teorema fundamental de la aritmética. Este afirma que todo número natural $n > 1$ o bien es primo, o bien puede escribirse (aparte del orden de los factores) como un producto único de números primos:

$$n = \prod_{i=1}^{r} p_i^{\alpha_i}.$$

Aquí r indica el número de primos p_i distintos, y α_i la multiplicidad de cada uno. En nuestro ejemplo, $132 = 2^2 \times 3^1 \times 11^1$. Por cierto: esta unicidad de la descomposición en primos es una de las razones por las que el 1 no se considera primo. Si lo fuera, podríamos escribir cualquier núme-

	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

1. CADA VEZ MÁS ESCASOS: En el siglo III antes de nuestra era, Eratóstenes concibió un algoritmo para determinar todos los números primos menores que un número natural dado. Aplicado a los números del 1 al 100 (*figuras*), este método nos dice que basta con eliminar (*gris*) todos los múltiplos de los primos menores que 10; es decir, 2, 3, 5 y 7. Al acabar, los números que sobrevivan (*rojo*) serán todos primos. El resultado permite ver que la «densidad» de números primos decrece a medida que recorremos los números naturales.

ro como producto de primos de muchas formas diferentes añadiendo una cantidad arbitraria de factores 1.

Al descomponer un número en sus factores primos podemos determinar todos sus divisores, su máximo común divisor o su mínimo común múltiplo, entre otras cosas. El teorema fundamental de la aritmética nos dice que los números primos son a la aritmética lo que los átomos de la tabla periódica a la materia del universo. Esa elementalidad justifica por sí sola la elección de Sagan. Pero si, además, el comportamiento de estos números básicos resulta impredecible y misterioso, se comprende la fascinación que matemáticos y aficionados han sentido por ellos a lo largo de la historia.

¿Por qué les cuento todo esto? Esta columna será la primera de una serie dedicada a la hipótesis de Riemann, uno de los problemas abiertos más famosos de la matemática y uno de los siete Problemas del Milenio propuestos por el Instituto Clay en el año 2000. Y si la hipótesis de Riemann ha ocupado a generaciones de matemáticos es por su íntima relación con los números primos, de modo que primero debemos sumergirnos en ellos.

En su artículo «Los primeros 50 millones de primos», el matemático Don Zagier describe poéticamente mi aspiración en esta columna:

Hay dos hechos sobre la distribución de los números primos de los que espero convencerles tan fuertemente que queden para siempre grabados en su corazón. El primero es que, a pesar de su sencilla definición y de su papel como ladrillos en la construcción de los números naturales, los números primos pertenecen a la clase más arbitraria y perversa de los objetos estudiados por los matemáticos: crecen como malas hierbas entre los números naturales, parecen no obedecer otras leyes que las del azar y nadie puede predecir dónde brotará el siguiente.

Y también en la que viene:

El segundo hecho es incluso más sorprendente, pues afirma justo lo contrario: que los números primos exhiben sorprendentes regularidades, que hay leyes que gobiernan su comportamiento y que obedecen estas leyes con precisión casi militar.

Y en efecto, en los números primos concurren el caos y el orden. De modo que comencemos por el caos.

¿Cuántos primos hay?

Mientras que los átomos de nuestro universo se presentan en una cantidad finita, fue en los *Elementos*, hacia el año 300 antes de nuestra era, donde Euclides escribió una demostración de que la cantidad de números primos era infinita. Su argumento, por reducción al absurdo, puede parafrasearse así: si existiera un número finito de números primos, el producto de todos ellos más 1 sería un número divisible por alguno de esos primos; pero entonces 1 también lo sería, lo cual es imposible.

En los más de dos milenios transcurridos desde la demostración de Euclides se han desarrollado múltiples variantes y pruebas alternativas de la infinidad de los números primos. En fecha tan reciente como 2006, Filip Saidak presentó una elegante demostración constructiva: para cualquier número natural $n > 1$, los números consecutivos n y $n + 1$ no pueden tener factores en común (también se dice que son «coprimos», ya que solo tienen

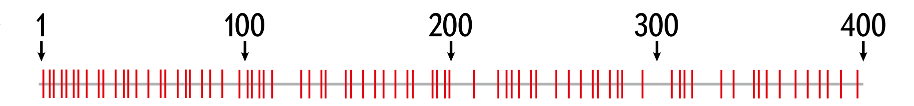
como divisor común al 1). Por tanto, el número

$$N_1 = n(n + 1)$$

ha de tener al menos dos factores primos distintos. De igual modo, puesto que N_1 y $N_1 + 1$ son consecutivos, también serán coprimos, y entonces

$$N_2 = N_1(N_1 + 1)$$

tendrá al menos tres factores primos. Como este proceso puede continuarse de manera indefinida, concluimos que existen infinitos números primos.



2. DISTRIBUCIÓN ERRÁTICA: A pesar de ser cada vez más escasos, la manera en que se reparten los números primos a lo largo de los naturales no parece seguir ninguna pauta bien definida. Esta imagen muestra la distribución de números primos entre los 400 primeros números naturales. Su aspecto parece completamente aleatorio.

¿Aparecen con regularidad?

Todos sabemos que, con las excepciones de 2, 3 y 5, si un número n es par, si la suma de sus dígitos es múltiplo de 3, o si acaba en 5, entonces no puede ser primo. Pero, más allá de eso, somos incapaces de encontrar patrones en el ritmo con que aparecen los números primos.

Eratóstenes, el bibliotecario de Alejandría que en el siglo III antes de nuestra era midió el tamaño del mundo, construyó tablas de primos gracias a un ingenioso algoritmo hoy conocido como criba de Eratóstenes. Su idea sigue estando en el corazón de muchos algoritmos modernos de descomposición y proporciona una idea muy clara de qué ocurre con los números primos a medida que recorremos los números naturales.

Para entender cómo funciona, apliquemos la criba a la lista de los 100 primeros números naturales (*véase la figura 1*). El número 2 es nuestro primer primo, el único primo par. Lo guardamos y tachamos de la lista todos los múltiplos de 2: estos serán siempre números compuestos, ya que siempre podrán dividirse entre 2.

Hecho esto, el siguiente número no tachado de la secuencia será necesariamente primo. Se trata del número 3, así que procedemos del mismo modo: lo guardamos y tachamos todos sus múltiplos. Repetimos la misma operación con el siguiente número no tachado, que es el 5, y eliminamos todos sus múltiplos. Y para acabar, hacemos lo mismo con el 7.

¿Por qué paramos en el 7? Solo necesitamos tachar los múltiplos de los números primos hasta 10, ya que todo número compuesto menor que 100 tendrá necesariamente un primo menor que 10 (una manera de verlo es que $11 \times 11 = 121$, que es mayor que 100). Y no tendremos que eliminar los números compuestos mayores que 10, ya que todos habrán sido previamente tachados. Por ejemplo, $91 = 7 \times 13$, y fue eliminado cuando tachamos los múltiplos de 7. En general, para encontrar todos los primos en $[2, n]$, solo necesitamos aplicar la criba hasta la raíz cuadrada de n.

Observemos que la criba de Eratóstenes, donde cada vez que encontramos un primo p tachamos todos sus múltiplos, nos está diciendo que la densidad de posibles primos en el intervalo restante, $[p, n]$, es necesariamente menor que en el intervalo $[2, p]$. De modo que la densidad de números primos va disminuyendo a medida que avanzamos. Si bien hay una cantidad ilimitada de primos, son perlas cada vez más escasas a medida que remontamos el río de los números naturales.

No obstante, si señalamos la posición de los números primos que hay entre los primeros 400 naturales, comprobaremos que la distribución parece totalmente aleatoria (*véase la figura 2*). ¿Cómo pueden aparecer de forma errática los números primos si son los ladrillos con los que están construidos los naturales a través de una operación tan elemental como la multiplicación? En ese aparente caos, los números primos deben esconder un orden oculto.

Tal vez las distancias que los separan se comporten algo mejor y nos den una pista. Si la densidad de números primos va decayendo, la «distancia media» entre primos sucesivos debe crecer. Sin embargo, es fácil demostrar que la distancia entre primos consecutivos puede alcanzar cualquier tamaño. Dado un número n, siempre podemos construir la siguiente secuencia de n números compuestos sucesivos:

$$(n + 1)! + 2,$$
$$(n + 1)! + 3,$$
$$\ldots$$
$$(n + 1)! + n + 1$$

donde el primero es divisible por 2, el segundo por 3, y así sucesivamente hasta el último, que es divisible por $n + 1$.

Al mismo tiempo, el teorema de Bertrand-Chebyshev, demostrado en 1850, nos asegura que entre el enésimo primo p_n y su doble, $2p_n$, nos encontraremos a p_{n+1}. Pero todo esto no impide, por ejemplo, que haya nueve primos entre los cien números comprendidos entre 9.999.900 y 10.000.000, y que entre los cien siguientes haya solo dos. Puede que la «densidad media» de primos decrezca a medida que recorremos los naturales, pero eso no parece impedirles seguir emergiendo de manera impredecible.

Conjeturas sencillas, soluciones inalcanzables

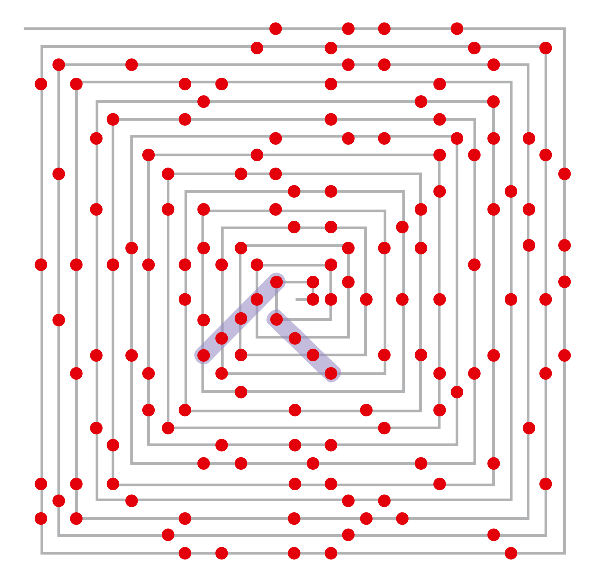
La teoría de números comenzó como una ciencia empírica, una búsqueda de patrones sustentada en ejemplos numéricos. Y a diferencia de otras ramas de la matemática, cuenta con una característica muy especial: existen multitud de problemas cuyo enunciado puede entender un niño, pero que ni siquiera los mejores matemáticos son capaces de resolver. Y como apuntaba el célebre G. H. Hardy, mientras que en algunas áreas de la matemática las primeras intuiciones sobre la veracidad de una conjetura suelen ser acertadas, en teoría de números cualquiera puede hacer una conjetura plausible que, seguramente, será falsa.

Una famosa conjetura que ilustra la impredecibilidad con que aparecen los números primos es la de los primos gemelos. Se dice que dos números primos son «gemelos» cuando están separados por una distancia de dos unidades, como (3, 5), (5, 7) y (11, 13), o el par más grande conocido hasta ahora: los números de 388.342 dígitos

$$2.996.863.034.895 \times 2^{1.290.000} - 1,$$
$$2.996.863.034.895 \times 2^{1.290.000} + 1,$$

computados en 2016 gracias a los proyectos colaborativos Twin Prime Search y PrimeGrid. La conjetura de los primos gemelos, que probablemente se propuso en la antigua Grecia, afirma que existe una cantidad infinita de tales pares de primos. Y ello a pesar de que, repetimos, los números primos son cada vez más escasos a medida que ascendemos por los

37	36	35	34	33	32	31
38	17	16	15	14	13	30
39	18	5	4	3	12	29
40	19	6	1	2	11	28
41	20	7	8	9	10	27
42	21	22	23	24	25	26
43	44	45	46	47	48	49



3. ESPIRAL DE ULAM: Al colocar los números naturales en una cuadrícula y ordenarlos en forma de espiral, puede comprobarse que los números primos (*rojo*) se sitúan sobre algunas líneas (*ejemplos en lila*) con más frecuencia de lo esperado. La imagen izquierda ilustra el proceso general para los primeros 49 números; la de la derecha muestra la distribución de primos sobre una cuadrícula mayor.

naturales. Existen conjeturas semejantes, también con nombre propio, como la de los primos primos (*cousin primes*), que son parejas que se encuentran a distancia cuatro, o los primos sexis (*sexy primes*), a distancia seis.

De hecho, la conjetura de Polignac, que data de 1849 y que afirma que existen infinitos primos consecutivos a cualquier distancia d, es una generalización de todas las anteriores y no ha sido dilucidada todavía para ningún valor de d. No obstante, en 2013 el matemático Yitang Zhang dio un gran paso al demostrar que existe al menos una distancia $d < 70.000.000$ para la que podemos asegurar la conjetura. En otras palabras: por muy lejos que vayamos y raleen los primos, siempre encontraremos parejas consecutivas a una distancia de menos de 70 millones.

Ese umbral se ha reducido hasta 246 gracias al proyecto colaborativo Polymath. Pero sus expertos opinan que los métodos desarrollados para alcanzar dicho umbral, aunque puedan apurar más el plato, no conseguirán bajarlo a 2. Tras 2000 años de esfuerzos matemáticos, y con la mayoría de los expertos apostando por su veracidad, la conjetura de los primos gemelos sigue siendo eso: una conjetura.

Este caso no es ni mucho menos único. Probablemente la conjetura más famosa sobre números primos sea la de Goldbach, la cual data de 1742 y afirma que todo número par mayor que 2 puede expresarse como la suma de dos primos. Por ejemplo, $18 = 11 + 5$ o $20 = 17 + 3$. Hasta ahora nadie ha encontrado ningún contraejemplo, pero tampoco nadie ha conseguido demostrar que la conjetura sea siempre cierta.

En 2013, Harald Andrés Helfgott se acercó más que nadie a su solución al demostrar la que hasta entonces había sido la conjetura «débil» de Goldbach: que todo número impar mayor que 5 puede expresarse como la suma de tres primos. Pero, a pesar de la sencillez de su enunciado, la conjetura de Goldbach sigue refractaria a la demostración, y zanjar la cuestión continúa siendo el sueño de muchos matemáticos.

Existen otras dos famosas conjeturas básicas sobre los números primos que, junto a la de Goldbach y la de los primos gemelos, se conocen como «problemas de Landáu». Se trata de la conjetura de Legendre, que afirma que siempre existe un número primo entre dos cuadrados perfectos, y la conjetura de la infinidad de primos de la forma $n^2 + 1$. Aunque en los cuatro casos se han conseguido avances significativos, hoy por hoy todos ellos siguen siendo longevas conjeturas.

Números primos y progresiones aritméticas

No pocos intrépidos aficionados a los números primos redescubren, mediante experimentos numéricos con ordenador o incluso a mano, que todo número primo $p > 5$ puede expresarse, o bien como $p = 6n + 1$, o bien como $p = 6n - 1$, lo que les lleva a pensar que han encontrado un patrón desconocido en los números primos. Veamos por qué la expresión no encierra ningún misterio.

Cualquier número natural n mayor que 6 puede escribirse como

$$n = 6c + r,$$

donde c es el cociente de la división $n/6$ y r el resto. Si el resto es 0, 2 o 4, entonces n es par y no es primo. Si el resto es 3, entonces

$$n = 3(2c + 1),$$

por lo que es divisible entre 3 y tampoco es primo. Por tanto, si n es primo, seguro que su resto es 1 o 5; es decir, puede escribirse como

$$n = 6c + 1$$

o como

$$n = 6c + 5 = 6(c + 1) - 1.$$

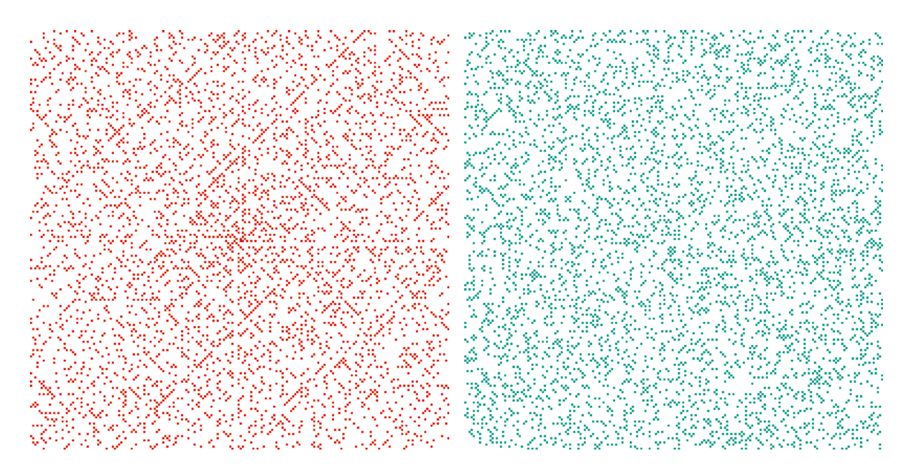
Aunque, por supuesto, esto no significa que todo número n que pueda escribirse de estas formas sea primo, por lo que no podemos usar estas expresiones para determinar si un número dado es primo o no. El lector puede comprobar que lo mismo pasa con los números de la forma $4n + 1$ y $4n + 3$.

Observe que, con el sencillo razonamiento anterior, hemos demostrado que los números generados por la suce-

sión aritmética $6c + a$, con $c = 1, 2, 3...$, no generan primos cuando a es distinto de 1 o 5, mientras que estos dos últimos casos se reparten toda su infinidad. ¿Qué ocurre con otras sucesiones?

El teorema de Dirichlet nos asegura que, para cualquier par de números naturales coprimos a y d, como son los casos de $a = 1$ y $a = 5$ con $d = 6$, existen infinitos números primos de la forma $a + dn$, donde n es un número natural. Otra cuestión es cuán larga puede ser una progresión aritmética de números primos. La progresión 5, 11, 17, 23, 29, con diferencia $d = 6$, se trunca en el siguiente valor, $29 + 6 = 35$, y es por tanto un ejemplo de longitud 5.

A primera vista se hace difícil creer que existan progresiones aritméticas de primos muy largas. Pero, en 2004, Terence Tao y Ben Green demostraron que existen progresiones aritméticas de números primos de longitud... ¡arbitrariamente larga! Por desgracia, su demostración no permite concretar ninguna de estas progresiones, algo que posibilitaría conseguir primos de cualquier tamaño de forma trivial.



4. ¿PATRONES VISUALES? Los ordenadores y las técnicas de visualización han aportado una nueva manera de estudiar los números primos. La imagen de la izquierda representa la distribución de números primos sobre la espiral de Ulam en una cuadrícula de tamaño 200 × 200. La de la derecha, una distribución aleatoria sobre la misma cuadrícula. Una simple inspección visual revela que los números primos presentan una cierta tendencia a alinearse en algunas rectas verticales, horizontales y diagonales.

La espiral de Ulam

El advenimiento de los ordenadores y su espectacular aumento en la capacidad de cómputo y de visualización ha ejercido un enorme impacto en la teoría de números. Un ejemplo famoso nos lo proporciona la espiral de Ulam. Durante su asistencia a una conferencia en 1963, Stanislaw M. Ulam comenzó a garabatear sobre una hoja cuadriculada la secuencia de los números naturales en forma de espiral. Para su sorpresa, al distinguir con círculos los números primos, estos parecían disponerse a lo largo de las diagonales con mucha más frecuencia de lo esperado (*véase la figura 3*). En palabras de Ulam, «exhibían una fuerte apariencia no aleatoria». ¿Había encontrado un patrón en la distribución de números primos?

Curiosamente, siete años antes, el escritor de ciencia ficción Arthur C. Clarke había descrito una espiral de primos semejante en su novela *La ciudad y las estrellas*. En ella, el personaje de nombre Jeserac, ayudado por su ordenador, buscaba patrones en la distribución de primos. Clarke nunca llegó a realizar ese experimento, pero cuando Ulam regresó del congreso a su lugar de trabajo en Los Álamos, programó el mastodóntico Maniac II, que disponía en su memoria de los primeros 90 millones de primos. Para su regocijo, los primos mostraban una tendencia a aparecer alineados en ciertas diagonales, rectas horizontales y verticales con mucha más frecuencia de la esperada (*véase la figura 4*). Si sobre la espiral colocáramos los primos al azar, jamás aparecería un patrón semejante. ¿Qué había encontrado Ulam?

Las sucesiones de números sobre las diagonales y las rectas verticales y horizontales se corresponden con sencillas sucesiones cuadráticas del tipo

$$4n^2 + bn + c\,,$$

donde b y c son enteros y $n = 0, 1, 2...$ Por ejemplo, tenemos una diagonal en la parte inferior izquierda con los primos 5, 19, 41, 71 y 109, la cual responde a la expresión

$$4n^2 + 10n + 5\,,$$

con n entre 0 y 4. De manera similar, la secuencia de primos 7, 23, 47 y 79, que aparece en una diagonal abajo a la derecha, se ajusta a la expresión

$$4n^2 + 4n - 1\,,$$

donde n toma valores desde 1 hasta 4. Cuando se inspeccionan las densidades de primos en las distintas diagonales, se muestran muy heterogéneas y en algunas abundan sobremanera. ¿Ocurrirá aquí como en el caso de las progresiones aritméticas?

En realidad, Euler ya había hallado que $n^2 + n + 41$ generaba una secuencia de 40 primos consecutivos (hasta decepcionarnos en $n = 40$) y había explorado otras progresiones cuadráticas que han sido motivo de estudio desde entonces. De hecho, lo que Ulam encontró fueron indicios visuales de una conjetura que Hardy y John Littlewood habían enunciado en 1923 y en la que estimaban una fórmula asintótica para la densidad de primos en sucesiones cuadráticas. Cosa que no desmerece el hallazgo de Ulam, que nos enseñó una nueva forma de explorar los números primos usando herramientas de visualización digital.

Espero que esta pincelada les haya transmitido la primera propiedad de los números primos de la que hablaba Zagier: su comportamiento irreverentemente azaroso. En la próxima columna intentaré convencerles de lo contrario: por qué los números primos parecen encerrar un orden oculto. IyC

PARA SABER MÁS

The first 50 million primes. Don Zagier en *The Mathematical Intelligencer*, vol. 1, págs. 7-19, agosto de 1977.
Merveilleux nombres premiers: Voyage au coeur de l'arithmétique. Jean-Paul Delahaye. Éditions Belin/Pour la Science, 2000.
The little book of bigger primes. Paulo Ribenboim. Springer, 2004.
A new proof of Euclid's theorem. Filip Saidak en *The American Mathematical Monthly*, vol. 113, págs. 937-938, diciembre de 2006.

EN NUESTRO ARCHIVO

A la búsqueda de números primos. Carl Pomerance en *IyC*, febrero de 1983.
Quiritmética. Bartolo Luque en *IyC*, junio de 2019.

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático emérito de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA FÍSICA

Max Planck y los «caballeros del continuo»

Reacciones ante la discontinuidad cuántica

José Manuel Sánchez Ron

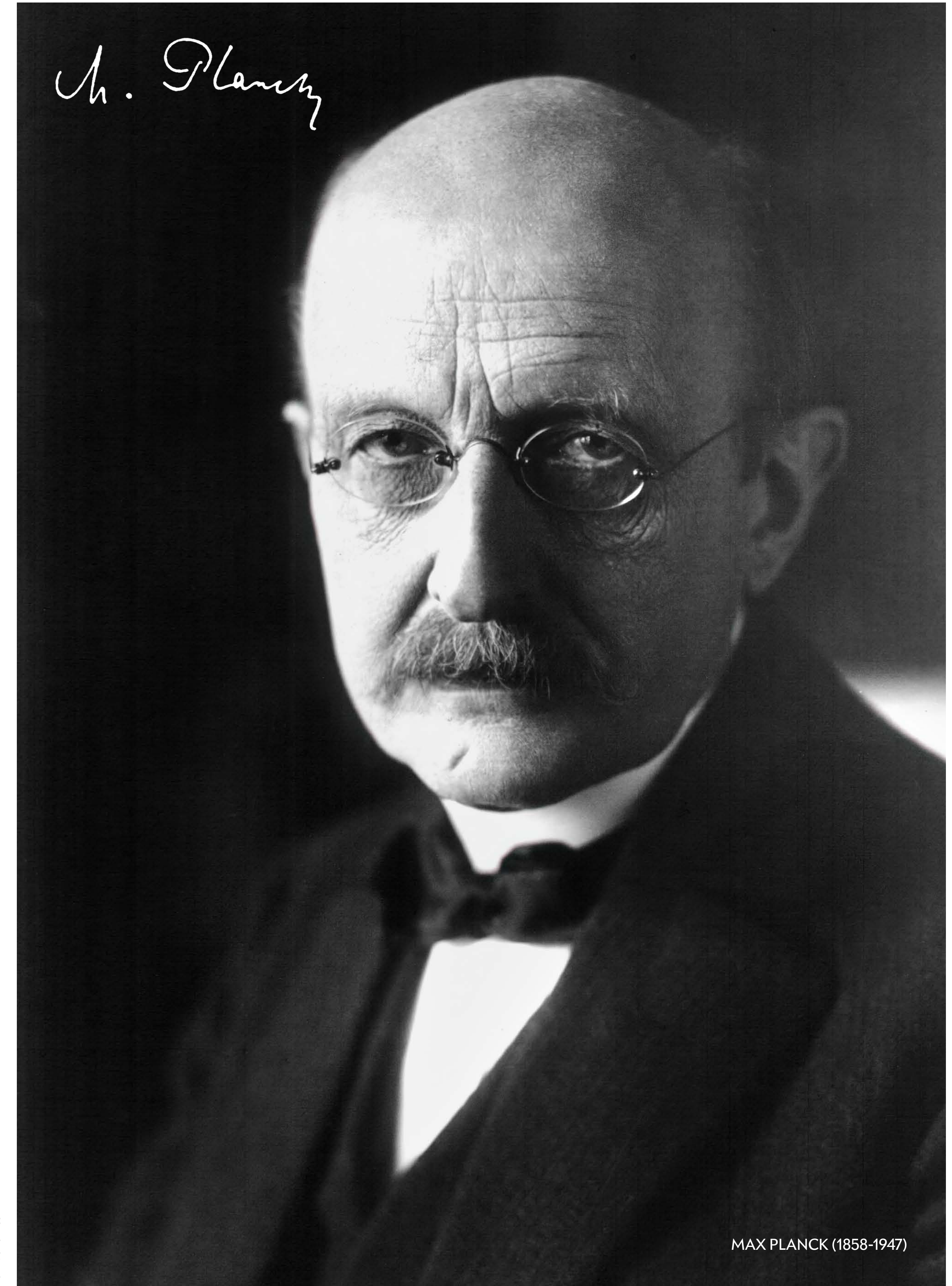
La mecánica cuántica violenta más que ninguna otra teoría científica nuestras formas intuitivas, observacionales, de comprender la naturaleza. No se trata solo, ni siquiera sobre todo, de su carácter probabilístico, sino de elementos como la dualidad onda-corpúsculo o de lo que se defiende en su interpretación más extendida, la denominada «interpretación de Copenhague»: antes de que lo observamos, un sistema se encuentra en todos sus estados posibles; únicamente al medir, al observarlo, se concreta en uno de esos estados posibles, y la teoría solo puede decirnos la probabilidad de que suceda así.

El «acto de desesperación» de Planck

Estrictamente, obviando desarrollos anteriores que la propiciaron, la revolución cuántica comenzó en 1900 cuando Max Planck, catedrático de física en la Universidad de Berlín, se vio obligado a introducir unos «elementos discretos de energía» en la radiación electromagnética para poder explicar la expresión matemática que había encontrado, de forma heurística, para la distribución de la radiación de un cuerpo negro. Asociados a una fórmula hoy universalmente conocida, $E = h\nu$ (donde E representa la energía, h una constante, luego denominada «constante de Planck», y ν la frecuencia de la radiación, entendida hasta entonces como una onda), esos «elementos discretos de energía» resultaban de utilizar la ley que Ludwig Boltzmann había desarrollado en 1877 para la entropía y que implicaba que esta (magnitud física que expresa la tendencia al desorden en cualquier sistema cerrado, incluido el universo) podía no aumentar siempre, como requería la física clásica; que se trataba únicamente de una «probabilidad», esto es, que podía suceder —aunque la probabilidad fuese pequeña— que en un sistema aumentase el orden con el paso del tiempo. Pero para Planck, para quien la física era la búsqueda de absolutos, el uso de probabilidades no era aceptable. Doblegarse ante el planteamiento de Boltzmann, aceptar que el crecimiento de la entropía estaba asociado con probabilidades, era para Planck particularmente doloroso.

Más de treinta años después, en una carta que escribió el 7 de octubre de 1931 al físico estadounidense Robert Williams Wood, Planck recordó que:

Resumido brevemente, se puede describir lo que hice como un acto de desesperación. Por naturaleza soy pacífico y rechazo toda aventura dudosa. Pero por entonces había estado luchando sin éxito durante seis años (desde 1894) con el problema del equilibrio entre radiación y materia y sabía que esta cuestión tenía una importancia fundamental para la física; también conocía la fórmula que expresa la distribución de la energía en los espectros normales. Por consiguiente, había que encontrar, costase lo que costase, una interpretación teórica. Tenía claro que la física clásica no podía ofrecer una solución a este problema, puesto que con ella se llega a que, a partir de un cierto momento, toda la energía será transferida de la materia a la radiación. Para evitar esto se necesita una nueva constante que asegure que la energía no se desintegre [...] En mi caso, el punto de partida fue el mantener las dos leyes de la termodinámica. Hay que conservar, me parece, estas dos leyes bajo cualquier circunstancia. Por lo demás, estaba dispuesto a sacrificar cualquiera de mis convicciones anteriores sobre las leyes físicas. Boltzmann había explicado cómo se establece el equilibrio termodinámico mediante un equilibrio estadístico, y si se aplica semejante método al equilibrio entre la materia y la radiación, se encuentra que se puede evitar la continua transformación de energía en radiación suponiendo que la energía está obligada, desde el comienzo, a permanecer agrupada en ciertos cuantos. Esta fue una suposición puramente formal, y en realidad no pensé mucho en ella.



MAX PLANCK (1858-1947)

DOMINIO PÚBLICO

El «acto de desesperación» al que se refería fue, como él mismo señalaba, adoptar la formulación estadística de la entropía propuesta por Boltzmann.

Los «caballeros del continuo»

La discontinuidad que Planck no aceptaba terminó convirtiéndose en un elemento fundamental en la mecánica que se estaba buscando para entender la radiación y el microcosmos. Fue un entonces joven y desconocido en el mundo científico, que trabajaba en la Oficina de Patentes de Berna, Albert Einstein, quien mostró en 1905 la necesidad de la discontinuidad de la radiación electromagnética, dando de esta manera un paso firme hacia la introducción de la «dualidad onda-corpúsculo». Veinte años después llegaba la primera formulación de una mecánica cuántica, de la que fue responsable otro joven, pero que ya formaba parte de la comunidad internacional de físicos: Werner Heisenberg. Y el año siguiente, 1926, Erwin Schrödinger ofrecía otra versión de mecánica cuántica, pero aparentemente muy diferente de la de Heisenberg: mientras la abstracta formulación de este (la mecánica de matrices, en la que la imagen física de órbitas no figuraba entre los constructos de la teoría), desarrollada con la ayuda de Max Born y Pascual Jordan, hacía hincapié en la discontinuidad y utilizaba un apartado matemático entonces poco frecuente (matrices de infinitas filas y columnas), la de Schrödinger (la mecánica ondulatoria) daba preferencia a la continuidad y se basaba en las familiares ecuaciones en derivadas parciales.

Ante esas dos formulaciones se produjo una manifiesta división en la comunidad de físicos, entre los que podríamos denominar físicos «cuánticos-clásicos» y los «radicalmente cuánticos». Representativo en este sentido es lo que Einstein escribió el 7 de marzo de 1926 en una carta a Hedwig Born, esposa de Max Born:

Los conceptos de Heisenberg y Born nos han dejado a todos sin respiración y han producido una profunda impresión en todos aquellos orientados a la teoría. En lugar de sombría resignación, ha surgido en nosotros, gente de sangre espesa, una singular tensión.

La altamente matemática y abstracta formulación de Heisenberg-Born-Jordan no suscitó demasiadas simpatías entre ellos, especialmente entre los físicos de Berlín, que, con «admiración y desconfianza a la vez, observaban el desarrollo de la mecánica cuántica» (Einstein a Ehrenfest, 28 de agosto de 1926). Esta postura de los «caballeros del continuo», como Heisenberg los llamaba en sus cartas a Pauli, se debía al carácter excesivamente abstracto de la teoría, que se había formulado prescindiendo de todo tipo de modelo «visual» para la descripción de los procesos atómicos. A Einstein, el formalismo matricial de Heisenberg le parecía, como manifestó en una carta que envió el 25 de diciembre de 1925 a su íntimo amigo el ingeniero Michele Angelo Besso, un «cálculo de hechicería, donde aparecen determinantes infinitos (matrices) en lugar de las coordenadas cartesianas. Esto es eminentemente ingenioso y, a causa de su complicación, está suficientemente protegido contra toda demostración de falsación».

De tono parecido eran los juicios emitidos por Max von Laue, otro miembro de la élite berlinesa, cuando se quejaba a Schrödinger el 12 de octubre de 1926, del «monstruoso tratamiento» que Wolfgang Pauli había dado al problema del átomo de hidrógeno utilizando el método matricial de Heisenberg.

Ante los sentimientos de repulsa y frustración que los trabajos de los físicos «matriciales» suscitaron entre los físicos berlineses, se puede comprender el alivio que estos —y otros— experimentaron cuando Schrödinger presentó, menos de medio año después de la teoría cuántica matricial, una mecánica ondulatoria que prometía un retorno a la más familiar física que describía los fenómenos físicos en forma causal mediante ecuaciones en derivadas parciales en el espacio y en el tiempo.

Aquellos a los que repugnaba renunciar a la máxima clásica *natura non facit saltus* recibieron con entusiasmo las contribuciones de Schrödinger. Einstein (carta a Schrödinger, 26 de abril de 1926) estaba seguro de que Schrödinger había «realizado un avance decisivo con su formulación de la condición cuántica, de la misma manera que estoy convencido de que el camino abierto por Heisenberg-Born es erróneo»; Planck (carta a Schrödinger del 2 de abril de 1926) leyó los artículos de 1926 «igual que un niño curioso escucha con suspense la solución de un rompecabezas que le ha preocupado durante mucho tiempo, y también estoy encantado con la belleza que salta a la vista»; y Hendrik Lorentz (carta a Schrödinger del 27 de mayo de 1926) señalaba que si «tuviese que escoger ahora entre su mecánica ondulatoria y la mecánica matricial, daría preferencia a la primera, debido a su mayor claridad intuitiva».

De hecho, el entusiasmo de Planck llegó a tal punto que, próxima ya su jubilación, eligió a Schrödinger como su sucesor en la cátedra de Berlín, puesto del que este tomó posesión el 1 de octubre de 1927, y al que sumaría en febrero de 1929 el de miembro de la Academia Prusiana de Ciencias. Sin embargo, pronto se descubrió que la interpretación de Schrödinger (que pretendía entender las partículas como paquetes de ondas) no se podía mantener, como se encargó de demostrar Lorentz, quien en la carta a Schrödinger del 27 de mayo de 1926 había mostrado no solo que entendía perfectamente la idea física que subyacía al artículo de Schrödinger, sino también sus problemas:

Su conjetura de que la transformación que tendrá que experimentar nuestra dinámica será similar a la transición de la óptica de rayos a la óptica ondulatoria resulta muy tentadora, pero tengo algunas dudas al respecto.

Si le he entendido correctamente, entonces una «partícula», un electrón por ejemplo, sería equiparable a un paquete de ondas que se mueve con la velocidad de grupo.

Pero un paquete de ondas, a la larga nunca puede permanecer unido ni confinado a un pequeño volumen. La más pequeña dispersión en el medio lo disgregará en la dirección de propagación, e incluso sin esa dispersión se abrirá más y más en la dirección transversal. Debido a esta inevitable dispersión del paquete de ondas, no me parece que sea muy adecuado para representar cosas a las que queremos adscribir una existencia individual permanente.

Por consiguiente, la dispersión de los paquetes de ondas hacía casi imposible el sostener la interpretación de las partículas como ondas. Ahora bien, los problemas con la interpretación física de Schrödinger de la mecánica ondulatoria no significaban que el formalismo de la teoría fuese incorrecto, solamente que había que descartar esa interpretación particular. Esto fue

confirmado por el descubrimiento, debido al propio Schrödinger, de la identidad matemática, formal, de la mecánica ondulatoria y la mecánica matricial.

Por su parte, los «paladines de la discontinuidad» no dudaban de su abstracto y discontinuo enfoque. Como escribía Heisenberg el 8 de junio a Pauli:

Cuanto más pienso en la parte física de la teoría de Schrödinger, más abominable la encuentro. Lo que Schrödinger escribe acerca de la claridad a duras penas tiene sentido; en otras palabras, pienso que es basura.

Pero por mucho que les desagradase la formulación de Schrödinger, no era posible dejarla de lado. Y los «caballeros del discontinuo» reaccionaron apropiándose del aparato formal de la mecánica ondulatoria y modificando radicalmente la interpretación que había dado Schrödinger. Un suceso representativo de la intensidad de semejante apropiación se produjo a finales de 1926, cuando Schrödinger viajó a Copenhague invitado por Bohr [*véase* «Heisenberg y Bohr en Copenhague», por José Manuel Sánchez Ron; Investigación y Ciencia, junio de 2020]. En su autobiografía, Heisenberg comentó aquella visita en los siguientes términos: «Las discusiones entre Bohr y Schrödinger empezaron ya en la estación de Copenhague, y se alargaron cada día desde las primeras horas de la mañana hasta muy avanzada la noche. Schrödinger vivía en casa de los Bohr, de forma que, por razones externas, apenas había ocasión para interrumpir el diálogo. Bohr era siempre singularmente respetuoso y afable en el trato con los demás. Sin embargo, en esta ocasión se comportó, a mi juicio, como un fanático empedernido, que no estaba dispuesto a hacer concesión alguna a su interlocutor o a permitir la más mínima falta de claridad». Las discusiones se prolongaron, sin llegar a un acuerdo, con tal intensidad que «a los pocos días, Schrödinger, debilitado por las discusiones, se puso enfermo y tuvo que guardar cama por un resfriado con fiebre. La señora Bohr le cuidaba y le llevaba té y pasteles, pero Bohr se sentaba al borde la cama y retornaba al tema con Schrödinger: “Usted tiene que comprender que...”».

Tras abandonar Copenhague, Schrödinger escribió a Wilhelm Wien (21 de octubre):

... la aproximación de Bohr a los problemas atómicos [...] es realmente llamativa. Está completamente convencido de que cualquier comprensión en el sentido habitual de la palabra es imposible. Por consiguiente, la conversación casi inmediatamente se dirige hacia cuestiones filosóficas, y pronto uno no sabe si sostiene realmente la posición que él está atacando o si debe atacar la posición que él está defendiendo.

Por su parte, Bohr daba cuenta del intercambio que había mantenido con Schrödinger en una carta que envió a Ralph H. Fowler el 26 de octubre:

Hemos disfrutado mucho con la visita de Schrödinger. Las discusiones se centraron gradualmente en el problema de la realidad física de los postulados de la teoría atómica. Todos estuvimos de acuerdo en que una teoría continua en la forma indicada en su último artículo conduce en un cierto número de puntos a expectativas fundamentalmente diferentes a las de la habitual teoría discontinua. El propio Schrödinger mantiene su esperanza de que la idea puede prescindir completamente de los estados estacionarios y de las transiciones, pero creo que al final conseguí convencerlo de que para que este deseo se haga realidad debe estar dispuesto a pagar un precio, en lo que se refiere a la reformulación de conceptos fundamentales, un precio formidable comparado con los contemplados hasta ahora por aquellos que apoyan la idea de una teoría continuista de los fenómenos atómicos. Entiendo que Schrödinger ha estado trabajando bajo la impresión de que la característica esencial de la mecánica matricial era el reconocimiento final de la imposibilidad de adscribir una realidad física a un estado estacionario individual, pero creo que esto es confundir los medios con los fines de la teoría de Heisenberg. Precisamente ahora en la mecánica ondulatoria poseemos los medios para representar un estado estacionario individual, que sirven para todos los fines que sean consistentes con los postulados de la teoría cuántica. De hecho, esta es la verdadera razón de la superioridad que en ciertos aspectos exhibe la mecánica ondulatoria cuando se la compara con el método matricial, que en otros aspectos es tan maravillosamente adecuado para mostrar la auténtica correspondencia entre la teoría cuántica y las ideas clásicas.

El último, y definitivo, «asalto de apropiación» de la mecánica ondulatoria provino de Max Born, quien dio a la función de onda de Schrödinger la interpretación probabilista, que todavía mantiene, en un artículo titulado «Sobre la teoría cuántica de las colisiones (comunicación preliminar)», que llegó a la redacción del *Zeitschrift für Physik* el 25 de junio de 1926 (fue publicado en el número del 10 de julio). IyC

PARA SABER MÁS

Letters on wave mechanics. A. Einstein et al. Dirigido por K. Przibram. Vision Press, Londres, 1967.
Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a. Band I: 1919-1929. Dirigido por A. Hermann, K. von Meyenn y V. F. Weisskopf. Springer-Verlag, Nueva York, 1979.
Niels Bohr collected works. Foundations of quantum physics I (1926-1932), vol. 6. Dirigido por J. Kalckar. North-Holland, Amsterdam, 1985.

EN NUESTRO ARCHIVO

Einstein y los comienzos de la física cuántica: de la osadía al desencanto. L. Navarro Veguillas en *IyC*, noviembre de 2004.



DISFRUTA DE TU UNIVERSO, NO TIENES OTRA OPCIÓN
Álvaro de Rújula
Catarata, 2020
288 págs.

Divulgación de autor

Una aproximación personal al universo

Un profesor de física cuántica solía decir, al respecto de la perplejidad que algunas personas sienten ante las propiedades de esta teoría: «Así es nuestro universo. Si no les gusta, cámbiense a otro». Este es el espíritu de *Disfruta de tu universo, no tienes otra opción*, traducción del original inglés publicado por Oxford University Press en 2018 y que ha sido elegido para abrir la nueva colección de libros de divulgación «Física y ciencia para todos», organizada por la Real Sociedad Española de Física y la Fundación Ramón Areces y editada por Catarata.

Ya en 1665, el científico inglés Robert Hooke nos advertía de que «la ciencia de la naturaleza ha sido durante demasiado tiempo asunto del cerebro y la fantasía: ya es hora de que vuelva a la simplicidad y la solvencia de la observación de cosas materiales y obvias». Hooke dejó escrito esto en su *Micrographia*, donde presentaba los resultados de sus observaciones con simples microscopios artesanales, incluidas algunas de las primeras descripciones conocidas de microorganismos. Han pasado más de cuatro siglos y, aunque obviamente a los físicos teóricos se nos pague por pensar en la naturaleza, tal vez convendría que no olvidáramos el consejo de Alberto Caeiro, uno de los heterónimos del poeta portugués Fernando Pessoa: «El universo no se hizo para que pensáramos en él / (pensar es estar enfermo de los ojos) / sino para que miráramos y estuviéramos de acuerdo».

Si nos dejamos llevar por la enfermedad de los ojos y nos olvidamos de mirar, nos puede pasar lo que acertadamente critica Álvaro de Rújula en este libro: que nos dé por hablar solo de aquello que dudosamente existe o que no existe en absoluto, como universos paralelos, partículas supersimétricas, variables ocultas, máquinas del tiempo... ¡Como si no hubiera suficiente con lo que sí existe! Esto es lo que propone De Rújula: echar una mirada al contenido real de nuestro universo y a todo lo que sabemos sobre él. No solo porque, como diría Woody Allen, sea el único lugar en que se puede encontrar un buen filete, sino porque además está lleno de cosas interesantes y sorprendentes.

Si nos olvidamos de mirar, nos puede pasar lo que acertadamente critica De Rújula: que nos dé por hablar solo de aquello que dudosamente existe o que no existe en absoluto

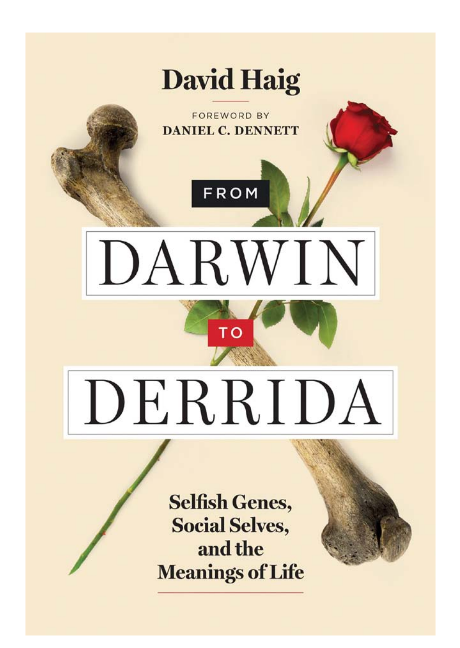
De este modo, mirando, el lector se encontrará en el libro con parejas de grandes agujeros negros que, cuando se funden, crean ondas gravitacionales, minúsculas oscilaciones del espaciotiempo que pueden detectarse a miles de millones de años luz de distancia con enormes y complejísimos aparatos, construidos a tal efecto en la Tierra gracias a las predicciones de la teoría de la relatividad general. La misma teoría que nos ha llevado a averiguar que el universo está lleno de materia oscura y energía oscura, cuyo origen y naturaleza todavía no comprendemos del todo. Hay también materia ordinaria, hecha de átomos, que se puede describir gracias a la física cuántica, la otra gran teoría de la física moderna. Y la combinación de la física cuántica y la relatividad nos lleva a la teoría cuántica de campos, que nos permite describir cosas aún más pequeñas: fotones, electrones, quarks, neutrinos y otras muchas partículas llamadas elementales, algunas de las cuales, como el bosón de Higgs, se han encontrado también gracias a gigantescos y complejos aparatos construidos a partir de las predicciones de la teoría. Algunas de esas partículas son las encargadas de transmitir las fuerzas fundamentales de la naturaleza, como ocurre con los fotones y la interacción electromagnética entre partículas con carga eléctrica. Otras son antipartículas, como el positrón, idéntico al electrón pero con carga positiva. Y, lo miremos por donde lo miremos, en nuestro universo hay también un fondo cósmico de microondas que lo llena todo. Tal vez el lector haya oído hablar de todas estas cosas en alguna ocasión, pero un buen catálogo le puede resultar útil.

Además de todo lo anterior, en este pequeño rincón del universo hay seres humanos, miles de millones. Y uno de ellos es Álvaro de Rújula, quien tiene, digamos, su propio universo. Y ese universo, como el fondo cósmico de microondas, permea todo el libro. La traducción del inglés es del propio De Rújula (lo cual tal vez explique hallazgos como «ubícuito» por ubicuo, «asimptótico» por asintótico o «un extra orden de magnitud más»). Entre las más de cien figuras —muchas de ellas en una separata central, lo que obliga a pasar cincuenta páginas adelante o atrás cada vez que se menciona una de ellas— encontramos numerosos dibujos, *collages* y memes de De Rújula con interés relativo. Los chascarrillos sobre viejos profesores, físicos experimentales, escudos de universidades, etcétera también son de De Rújula. Incluso el constante (ab)uso de paréntesis («luminosidad (lumínica)» llegamos a leer en la página 136) y las más de cien notas al pie son también suyas. La lectura resulta agitada: cuando por fin hemos regresado de nuestro viaje a las figuras, enseguida tenemos que vol-

ver a viajar, esquivando paréntesis, hacia una nota al pie, de manera que la vista no puede reposar más de cinco segundos seguidos.

De igual forma que uno no puede leer de la misma manera una novela de James Joyce que una de Agatha Christie, pero ambas pueden ser una experiencia gratificante, tal vez convenga que el lector no se acerque a este libro como si fuera un libro de divulgación al uso. Por ejemplo, es mejor no intentar encontrar una explicación al orden de los capítulos o de las argumentaciones; hay más caos que cosmos en este universo, como ocurre con los monólogos interiores. Tampoco es este el lugar más adecuado para profundizar en alguno de los múltiples temas que se plantean o para entender mejor conceptos sutiles como el espín de las partículas o la llamada paradoja de los gemelos de la teoría de la relatividad. Sin embargo, si este libro cae en las manos del lector, siempre puede pensar: «Disfruta de Álvaro de Rújula, no tienes otra opción».

—Carlos Sabín
Instituto de Física Fundamental (CSIC), Madrid



FROM DARWIN TO DERRIDA
SELFISH GENES, SOCIAL SELVES, AND THE MEANINGS OF LIFE
David Haig
MIT Press, 2020
512 págs.

El sentido de la vida

De cómo la selección natural genera intención, propósito y significado en la naturaleza

En un momento de la famosa escena del bar de la película *Malditos bastardos,* de Quentin Tarantino, unos oficiales nazis y unos espías americanos camuflados de nazis deciden jugar a «adivina quién soy». Anotan personajes en unas tarjetas, las intercambian y cada uno se pone una sobre la cabeza, de manera que todos pueden verla menos su portador. En la del oficial nazi que empieza el juego se lee «King Kong». La respuesta afirmativa a sus preguntas —«¿He visitado América?», «¿Fui en un barco?», «¿Me llevaron encadenado?», «¿Me exhibieron encadenado al llegar?»— le llevan a concluir que es la historia de los negros en América. Cuando le dicen que se equivoca, afirma rotundamente: «Entonces debo ser King Kong».

Desde muy al principio, los realizadores de la película *King Kong* de 1933 salieron al paso de numerosas críticas que veían en la película una alegoría del tráfico de esclavos: tan solo se trataba, aseguraban, de una película de aventuras. «Para mí», declararía Tarantino al respecto en una entrevista, «es muy obvio. ¡Por supuesto que *King Kong* es una metáfora del comercio de esclavos! No estoy diciendo que los realizadores lo hicieran a propósito, pero esa es la película que hicieron, lo tuvieran en mente o no». La legitimidad de interpretar una obra artística de una forma diferente a como la concibió su creador es un debate antiguo, y el punto de vista de Tarantino es el de la escuela filosófica posmoderna de Jacques Derrida. También es el de David Haig, biólogo evolutivo de Harvard, para interpretar la biología.

Para Haig, la biología se vuelve incomprensible, o al menos su descripción resulta incompleta, si insistimos en dejar al margen la función, la cual desempeña en biología el papel de significado. Todo parte, nos dice, de la brecha que Francis Bacon abrió en el conocimiento con su obra de 1605 *El avance del saber*. Aristóteles clasificó las causas en cuatro tipos: material, efectiva, formal y final. Sin embargo, Bacon denuncia las dos últimas como perjudiciales para el avance de la ciencia. Nada aporta, por ejemplo, decir que las cosas caen porque su fin es acercarse al centro de la Tierra. La ciencia debe ser explicada únicamente a partir de causas materiales y efectivas [*véase* «Naturaleza y finalidad», por Héctor Velázquez Fernández; Investigación y Ciencia, mayo de 2015].

El impacto de Francis Bacon en el pensamiento posterior llevó a la división del conocimiento en ciencias y humanidades, abarcando estas últimas todas las disciplinas en las que la finalidad constituye una explicación legítima. La biología quedó así en tierra de nadie. Por un lado, aspiraba a ser una ciencia; por otro, sus explicaciones son teleológicas porque recurren una y otra vez a la función, a la finalidad. De esta ambigüedad vino a rescatarla Darwin con la selección natural: no hace falta pensar, como Lamarck, que la función hace al órgano; un proceso ciego de azar y selección conduce al mismo resultado. La biología es, pues, una ciencia.

Y, sin embargo, Haig defiende que, sin negar nada de lo anterior, prescindir de la finalidad (función) en biología solo produce explicaciones a medias. Por ejemplo, resulta perfectamente legítimo sostener que el corazón es una bomba hidráulica y explicar de forma pormenorizada cada paso evolutivo que ha llevado a su aparición. Pero el corazón solo adquiere su pleno sentido en el contexto de un organismo que necesita llevar oxígeno y nutrientes a todas sus células. Los mecanismos de bombeo que mueven el corazón son los elementos de información de los que se vale la selección natural para encontrar un significado: un sistema de bombeo que mueva la sangre a todas partes. Y podría haber hallado cualquier otro, pero el contexto —el ambiente— determina el signi-

ficado. Por sí mismos, unos mecanismos de bombeo no son un corazón. Del mismo modo, una proteína que cambia de configuración cuando sobre ella incide un fotón puede convertirse en un detector de luz o acabar generando un mecanismo de visión. La configuración es la información, que puede usarse de infinidad de formas. Lo que hace que acabe formando parte de un protoojo es interpretarla como detector de luz.

Haig ilustra su tesis con otro ejemplo precioso, los transposones. Un transposón es un segmento de ADN que se transcribe a una cadena de ARN capaz de hacer dos cosas: sintetizar ciertas proteínas y servir de «molde» para regenerar la cadena de ADN original, que luego esas mismas proteínas se encargarán de introducir en algún otro lugar del genoma. ¿Qué es el transposón, el ADN, el ARN o acaso las proteínas?

Lo único que podemos afirmar sin equivocarnos es que hay un elemento informativo que se materializa, ora de una forma, ora de otra. Pero todo este mecanismo no existe de forma aislada, sino en el contexto del genoma, donde hay procesos que reparan la cadena de ADN buscando y eliminando errores o parásitos. Y es entonces cuando se revela su significado: el mecanismo que lo forma le permite escapar de su aniquilación saltando de un sitio a otro del genoma. ¿No tiene más sentido, pues, describir el transposón como un mecanismo *cuyo fin* es cambiar constantemente de lugar en una huida perpetua de su aniquilación? ¿Dejamos de hacer ciencia si lo hacemos? ¿O más bien tenemos que aceptar que las causas finales existen gracias a la selección natural?

Desde la aparición de interruptores moleculares hasta la emergencia de códigos morales, todo cae dentro del paraguas darwiniano, y Haig dedica la primera parte de su libro a explicar este proceso en detalle. En lo esencial se alinea con Richard Dawkins cuando basa sus explicaciones en el mecanismo «egoísta» de los replicadores. Pero hay una diferencia esencial que, de algún modo, actualiza la idea original de Dawkins. Haig observa que, con frecuencia, los replicadores forman coaliciones cuando eso les confiere ventajas evolutivas, y, al compartir destino, convierten esas coaliciones en nuevas unidades de replicación, o correplicadores. Tales son los cromosomas (coaliciones de genes), las células (de cromosomas, proteínas y lípidos), los organismos pluricelulares, las comunidades ecológicas o la misma sociedad. La diferencia es importante, porque una coalición implica también un conflicto doble: entre los integrantes de la coalición por un lado, porque sus objetivos no siempre coinciden, y entre el correplicador y sus integrantes, porque a veces lo que beneficia al todo no beneficia a sus partes. Buena parte de la biología, la psicología o la sociología puede explicarse como resultado de estos conflictos.

Mucho se ha escrito sobre los conflictos entre las partes: la lucha entre los cromosomas X e Y, entre genes paternos y maternos, entre miembros de una camada, etcétera. Para ilustrar el conflicto entre el todo y sus partes, Haig recurre a la metáfora de Dawkins según la cual somos «robots pilotados por sus genes». Está claro, dice Haig, que no pueden pilotarnos como si fuéramos coches o aviones, porque hay una discrepancia enorme entre escalas temporales. Los genes solo pueden cambiar en tiempo evolutivo, mientras que los robots deben responder a situaciones en tiempo real. Podemos compararlo con una nave no tripulada que se envía a un planeta lejano. Debido al retraso de las señales, no puede ser manejada desde la Tierra. Así que lo más que pueden hacer los genes, al igual que los ingenieros de la nave, es dotar al robot de principios generales, instintos, deseos, etcétera, y dejar que sean autónomos. En este proceso han llegado incluso a diseñar algo tan complejo como un cerebro, capaz de solventar los conflictos que, de nuevo, se generan entre las distintas urgencias inducidas por diferentes grupos de genes. En función de la situación, el cerebro las sopesa y toma la «mejor» decisión posible. Y funciona bien para los genes... la mayor parte de las veces. Pero, en ocasiones, el robot se vuelve contra sus creadores. Por ejemplo, al sopesar entre el deseo sexual y la carga que supone criar hijos, el cerebro humano ha inventado los anticonceptivos. O como respuesta al conflicto entre la infertilidad y el deseo de tener hijos, ha inventado la adopción. Ninguna de estas soluciones beneficia a sus genes.

En alrededor de diez capítulos, Haig desciende a los detalles de la adaptación por selección natural explicando las diversas etapas evolutivas que van desde la aparición de los primeros genes hasta la emergencia de códigos morales en las sociedades, cubriendo de este modo, con una única herramienta metodológica, la brecha que separa las ciencias de las humanidades. Todo adquiere sentido a la luz de la evolución. El resto del libro es su parte más abstracta, aquella en la que trata de explicar el proceso de adaptación por mutación y selección como la traducción de información a significado. Significado que, a su vez, condiciona el tipo de información admisible, lo que crea un bucle de realimentación interpretable como intencionalidad. Algo similar a lo que ocurría en el juego de *Malditos bastardos,* pero con una variante: la tarjeta está vacía y las respuestas «sí» o «no» se dan al azar, con la única condición de que mantengan una coherencia con las respuestas anteriores. El proceso acabará convergiendo a una persona; la información al azar (las respuestas) está condicionada por el significado (las preguntas previas), y el resultado parece intencional. Sin duda, esta es la parte más dura de leer, aunque también la más interesante, filosófica e inspiradora.

From Darwin to Derrida no es un libro fácil. No es lectura de playa ni lo recomendaría para combatir el insomnio. Por otro lado, no está nada claro el perfil de su potencial lector. Parece escrito para su amigo Daniel Dennett —cuya magnífica introducción aconsejo releer al terminar el libro—, pero ¿cuántos «lectores Dennett» hay en el mundo? Y es que Haig no ha escrito un libro de divulgación, sino un profundo ensayo que requiere tanto familiaridad con la teoría evolutiva como aprecio por el razonamiento filosófico. Tampoco ha escogido el camino más sencillo. La primera parte del libro está muy condicionada por artículos que ya había publicado en otros medios y que ha reescrito y revisado para elaborar su gran argumento. Eso dificulta tener una perspectiva de conjunto, que uno no empieza a adquirir hasta cerca del final. Cada capítulo en sí discute un aspecto muy interesante del proceso evolutivo, pero a veces uno se pregunta qué relación guarda con los anteriores. No obstante, el propio Haig parece ser consciente de ello y, coherente con las ideas que defiende, él mismo afirma que el libro está escrito para producir en el lector la respuesta que busca. En otras palabras: el ensayo tiene una intención, un propósito. Si el significado que los lectores extraigamos de él es ese o más bien otro que no estaba previsto es algo que queda en manos de la selección natural.

—José Cuesta
Universidad Carlos III de Madrid

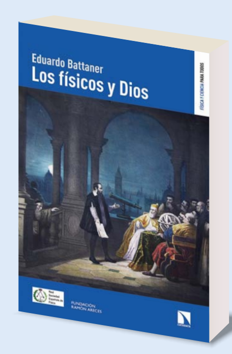
NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



EL GRAN LIBRO DE LAS ENFERMEDADES

Lukasz Kaniewski y Karolina Kotowska
Reservoir Books, 2020
ISBN: 9788417511999
72 págs. (18,90 €)

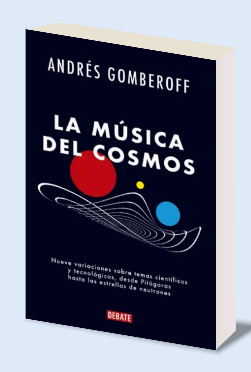


LOS FÍSICOS Y DIOS

Eduardo Battaner
Catarata, 2020
ISBN: 978-84-1352-072-8
128 págs. (14 €)

LA MÚSICA DEL COSMOS
NUEVE VARIACIONES SOBRE TEMAS CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS, DESDE PITÁGORAS HASTA LAS ESTRELLAS DE NEUTRONES

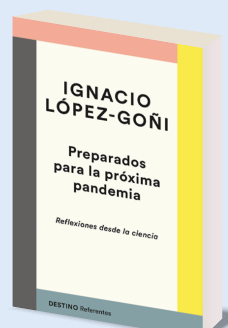
Andrés Gomberoff
Debate, 2020
ISBN: 9789566042358
eBook (7,99 €)



UNA NUBE EN UNA BOTELLA Y OTROS EXPERIMENTOS

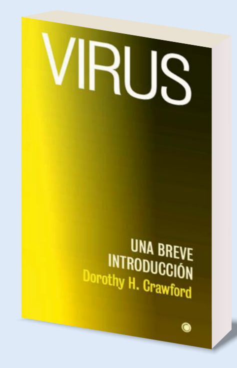
Jordi Mazón y Marcel Costa
Lectio Ediciones, 2020
ISBN: 978-84-16918-71-3
60 págs. (10,50 €)





PREPARADOS PARA LA PRÓXIMA PANDEMIA
REFLEXIONES DESDE LA CIENCIA

Ignacio López-Goñi
Destino, 2020
ISBN: 978-84-233-5825-0
160 págs. (12,90 €)

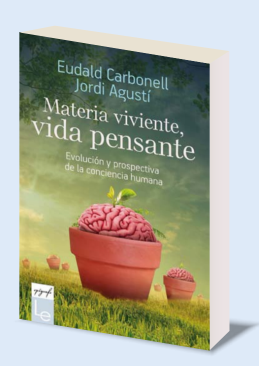


VIRUS
UNA BREVE INTRODUCCIÓN

Dorothy H. Crawford
Antoni Bosch, 2020
ISBN: 978-84-121063-8-1
232 págs. (13,50 €)

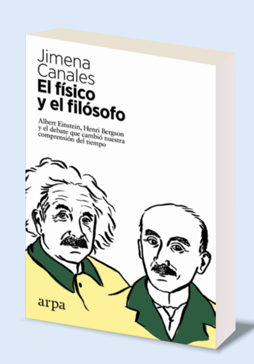
MATERIA VIVIENTE, VIDA PENSANTE
EVOLUCIÓN Y PROSPECTIVA DE LA CONCIENCIA HUMANA

Eudald Carbonell y Jordi Agustí
Lectio Ediciones, 2020
ISBN: 978-84-16918-78-2
224 págs. (18,50 €)



EL FÍSICO Y EL FILÓSOFO
ALBERT EINSTEIN, HENRI BERGSON Y EL DEBATE CAMBIÓ NUESTRA COMPRENSIÓN DEL TIEMPO

Jimena Canales
Arpa, 2020
ISBN: 978-84-17623-63-0
512 págs. (22,90 €)



Recopilación de Daniel C. Schlenoff

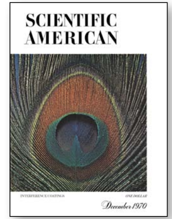
DICIEMBRE

1970

Fecundación in vitro

«En laboratorios del Hospital General de Oldham, en Lancashire, y de la Universidad de Cambridge ya se ha conseguido la maduración de óvulos humanos. Se han fecundado y cultivado in vitro hasta el estado de blastocistos, fase del desarrollo inmediatamente anterior al comienzo de la implantación normal del óvulo en el útero. Con esos procedimientos, debería ser clínicamente posible obviar ciertas causas de infertilidad y evitar el desarrollo de embriones de los que de otro modo sería esperable un crecimiento anómalo. Incluso pueden vislumbrarse más posibilidades. Los óvulos fecundados en el laboratorio y cultivados hasta el estado de blastocistos por R. G. Edwards y Ruth E. Fowler podrían retornarse a la madre con una gran probabilidad de culminar un desarrollo normal.»

El primer bebé concebido por fecundación in vitro nació en el Hospital de Oldham en julio de 1978.



1970



1920



1870

1920

Acorazados o aviones torpederos

«Al comentar ciertos artículos publicados en *Quarterdeck*, en los que se proponía prescindir de los superacorazados, el contraalmirante Fiske afirma que la mayoría de quienes se oponen a un desarrollo al máximo de la aeronáutica no han estudiado a fondo sus posibilidades. Cree, con muchos otros, que la aviación supondrá “toda una revolución en el arte de la guerra, comparada con la cual la revolución que produjo la invención de las armas de fuego fue como un espectáculo de variedades”. ¡Palabras estas bastante fuertes para un almirante!»

Tras el desplome monetario

«Una consecuencia del punto muerto en las importaciones y exportaciones entre Alemania y otros países debido a la devaluación del marco alemán es una modificación del sistema de trueque. Varios intereses algodoneros británicos han elaborado planes para encargar hilados a fábricas de algodón alemanas, a las que suministran el algodón en rama, quedándose estas con parte del producto en pago del uso de la fábrica, la mano de obra y otros costes de producción.»

1870

Espiritualismo

«El negocio del espiritualismo es una fuente de grandes males, y ha llevado la demencia a numerosas familias. Nuestros lectores deben saber que ningún hombre de ciencia ni ningún hombre cuerdo inteligente tienen fe alguna en él. A la luz de la ciencia, toda la cuestión se revela un abuso. Pero, tal como dice el doctor William A. Hammond: “El espiritualismo es una religión. Como tal lo abrazan tenazmente mucha gente bien intencionada. Razonar con tales personas sería malgastar el tiempo, igual que lo sería intentar, con palabras, librar a un loco de sus delirios. La emoción, el interés o lo inesperado podrían cambiarlas, pero los hechos nunca”.»



1870: Un práctico diseño de buzón a la intemperie.

Patentes para Correos

«Para fijar los buzones a las farolas, el recipiente lo forman dos hemisferios. Las ranuras carecen de tapas móviles y están protegidas por un escudo saledizo, tal como se muestra. Ello resulta muy cómodo, pues las cartas pueden introducirse con una sola mano. Se obvia así tener que cerrar un paraguas bajo la lluvia, o dejar en el suelo una cesta o un niño que se lleve en brazos, para echar una carta al buzón. El buzón ha sido patentado por Albert Potts, de Filadelfia (Pensilvania) a través de la Agencia de Patentes de *Scientific American*.»

Hachís

«El doctor H. C. Wood, Jr., ha escrito un ensayo que ha leído ante la Sociedad Filosófica Americana, en el cual informa de algunos experimentos que llevó a cabo con productos de hachís cultivado en Kentucky. El experto obtuvo un extracto alcohólico de hojas desecadas, e ingirió en una dosis casi todo el producto de 45 gramos de esas hojas con el efecto de una intoxicación profunda. Otros de los ensayos que realizó le han convencido de que ese hachís es más fuerte que el procedente de la India. Una planta del país será siempre más fiable que una importada, porque además de tener mayor frescura. su precio resulta insignificante.»

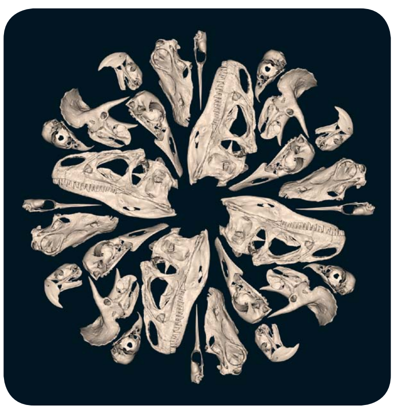
SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XXIII, N.º 25, 17 DE DICIEMBRE DE 1870

EVOLUCIÓN

La diversificación de las aves

Kate Wong

La diversidad de las aves modernas raya lo increíble. Un nuevo estudio matiza cómo alcanzaron supuestamente ese gran éxito evolutivo.





AGRICULTURA

El futuro de los cultivos tradicionales

Francesc Casañas, Joan Simó y Joan Casals

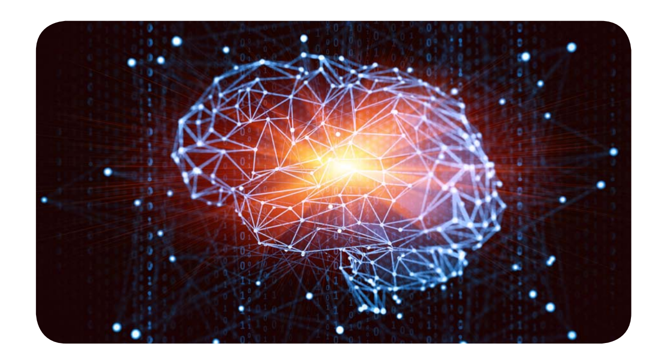
Ante la actual globalización agroalimentaria, ¿qué ventajas nos aportan las variedades agrícolas tradicionales? ¿Qué estrategias permiten mantener y fomentar la biodiversidad de los cultivos mediterráneos?

SOCIOLOGÍA

La pandemia que olvidamos

Scott Hershberger

La gripe de 1918 mató a millones de personas, pero luego desapareció de la memoria colectiva. ¿Ocurrirá lo mismo con la COVID-19?



TECNOLOGÍA

La espintrónica imita al cerebro

Julie Grollier y Damien Querlioz

En términos energéticos, el cerebro es mucho más eficiente que los ordenadores. ¿Cabe inspirarse en él para fabricar mejores dispositivos?

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado
PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN
Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

José Óscar Hernández Sendín: *Apuntes*; Fabio Teixidó: *Apuntes* e *Intrusos interestelares*; Ernesto Lozano: *La mayor colisión de agujeros negros observada hasta la fecha* y *Cómo conseguir una buena ventilación*; M. Gonzalo Claros: *Las secuencias reguladoras del genoma, a mayor detalle*; Ana Mozo: *Del sida a la COVID-19*; Pedro Pacheco: *El ADN antiguo revela la evolución de los perros en los últimos 11.000 años, El problema con nuestra dentadura, El sexismo y el racismo persisten en la ciencia, Distanciamiento social en el mundo animal* y *Beneficios sociales de la sincronía*; Miguel A. Vázquez Mozo: *La cuantización de la conductancia de Hall*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España